

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики і електротехніки

(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій

(повна назва кафедри)

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри



В. М. Рябенський

д.т.н., професор

« 19 » червня 2026 р.

Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: Розробка пристрою моніторингу гібридного інвертора

Виконав: студент

4327ст3 групи



О. В. Палькевич

(підпис)

Керівник роботи:

старший викладач каф. ПЕЕТ

(посада, науковий ступінь, вчене звання)



С.Л. Трибулькевич

(підпис)

м. Миколаїв – 2026 року

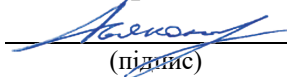
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра	<u>програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій</u>
Спеціальність	<u>171 «Електроніка»</u>
Освітня програма	<u>Електронні системи</u>

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

 О. С. Дьяконов
(підпис)

« 20 » березня 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр» (освітньо-кваліфікаційний рівень)

Студенту Палькевичу Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка пристрою моніторингу гібридного інвертора

керівник роботи Трибулькевич Сергій Леонідович, старший викладач каф. ПЕЕТ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ректора № 286-уч. від « 22 » квітня 2026 року.

2. Термін подання роботи: «09» червня 2026 року

3. Вихідні дані по роботі: _____

Об'єкт дослідження: системи моніторингу та енергоменеджменту гібридних сонячних електростанцій. Технічна база: мікроконтролер ESP32-S2, протокол Modbus RTU та операційне середовище ESPHome.

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів) _____

Аналіз існуючих рішень; Схемотехніка пристрою; Архітектура програмного забезпечення системи; Тестування роботоспроможності; Охорона праці

5. Перелік презентаційних матеріалів _____

1. Титульний слайд. 2. Актуальність теми. 3. Мета та завдання роботи. 4. Аналіз існуючих рішень. 5. Структурна схема системи. 6. Обґрунтування компонентної бази. 7. Схемотехніка пристрою. 8. Архітектура програмного забезпечення. 9. Алгоритми функціонування. 10. Інтерфейс користувача та моніторинг. 11. Тестування та результати. 12. Висновки

6. Консультанти розділів роботи

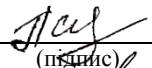
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
5	Тубальцев А. М., доцент каф. екології та природоохоронних технологій		

7. Дата видачі завдання « 23 » квітня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вибір теми	Не пізніше 20 березня 2026	виконано
2.	Визначення мети, завдань, об'єкта та предмета дослідження	Березень 2026	виконано
3.	Підбір і опрацювання списку використаних джерел	Березень – квітень 2026	виконано
4.	Виконання кваліфікаційної роботи	Квітень – травень 2026	виконано
	Вступ	Квітень 2026	виконано
	Розділ 1	Квітень 2026	виконано
	Розділ 2	Травень 2026	виконано
	Розділ 3	Травень 2026	виконано
	Розділ 4	Травень 2026	виконано
	Розділ 5	Травень 2026	виконано
5.	Оформлення кваліфікаційної роботи	Не пізніше 8 червня 2026	виконано
6.	Підготовка доповіді і презентації	Не пізніше 16 червня 2026	виконано
7.	Підготовка до захисту	Травень – червень 2026	виконано
	Оформлення авторського договору та заяв	Травень 2026	виконано
	Передача роботи для перевірки на плагіат	Не пізніше 9 червня 2026	виконано
	Отримання відгуку наукового керівника	Не пізніше 16 червня 2026	виконано
	Попередній захист	Не пізніше 16 червня 2026	виконано
	Отримання рецензії	Не пізніше 18 червня 2026	виконано
	Отримання допуску до захисту (підпис завідуючого кафедри)	Не пізніше 22 червня 2026	виконано
8.	Захист кваліфікаційної роботи	23-24 червня 2026	виконано

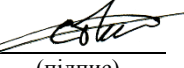
Студент


(підпис)

О. В. Палькевич

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

С.Л. Трибулькевич

(прізвище та ініціали)

Анотація

Кваліфікаційна робота присвячена розробці пристрою моніторингу для гібридного сонячного інвертора серії Must PH1800. У роботі проведено аналіз існуючих хмарних та локальних рішень для телеметрії, обґрунтовано переваги концепції Edge Computing для підвищення частоти опитування та автономності системи. Розроблено апаратне забезпечення на базі мікроконтролера ESP32-S2 із використанням гальванічно ізольованого інтерфейсу RS-485 для стабільного збору даних за протоколом Modbus RTU в умовах значних електромагнітних завад. Програмна частина реалізована на базі ОС ESPHome, що забезпечує асинхронне опитування регістрів, локальну візуалізацію даних на OLED-дисплеї та інтеграцію з системами домашньої автоматизації через зашифрований протокол Native API. Проведено верифікацію системи за допомогою програмно-емульованого стенда в середовищі Wokwi.

Ключові слова: гібридний інвертор, моніторинг, телеметрія, ESP32-S2, MODBUS RTU, EspHome, сонячна енергетика, edge computing, кібербезпека.

Abstract

The qualification work is devoted to the development of a monitoring device for the Must PH1800 hybrid solar inverter series. The work analyzes existing cloud and local solutions for telemetry, substantiates the advantages of the Edge Computing concept for increasing the polling frequency and autonomy of the system. Hardware is developed based on the ESP32-S2 microcontroller using a galvanically isolated RS-485 interface for stable data collection using the Modbus RTU protocol in conditions of significant electromagnetic interference. The software part is implemented based on the ESPHome OS, which provides asynchronous polling of registers, local data visualization on the OLED display and integration with home automation systems via the encrypted Native API protocol. The system is verified using a software-emulated stand in the Wokwi environment.

Keywords: hybrid inverter, monitoring, telemetry, ESP32-S2, MODBUS RTU, EspHome, solar energy, edge computing, cybersecurity.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень та термінів..	6
Вступ.....	7
Розділ 1. Аналіз існуючих рішень.....	9
1.1. Архітектура систем збору даних та фізичні інтерфейси телеметрії.....	9
1.2. Порівняльний аналіз хмарних систем та локальних edge-контролерів.....	10
1.3. Локальні проксі-сервери, пропрієтарні протоколи та реверс-інжиніринг	17
1.4. Кібербезпека та кіберфізичні загрози в промисловій телеметрії	19
Висновки до розділу	21
Розділ 2. Схемотехніка пристрою	24
2.1. Загальні положення.....	24
2.2. Опис функціональних блоків та їх взаємозв'язків	24
2.3. Обґрунтування та опис компонентної бази системи	27
2.4. Схемотехніка інтерфейсу обміну.....	29
Розділ 3. Архітектура програмного забезпечення системи.....	34
3.1. Архітектура програмного забезпечення та середовище розробки	34
3.2. Опис програмних модулів системи	34
3.3. Реалізація розрахункових лямбда-функцій	38
Розділ 4. Тестування роботоспроможності.....	42
4.1. Методика та програмно-апаратний стенд верифікації.....	42
4.2. Аналіз результатів симуляції та завантаження системи	42
4.3. Тестування мережевої підсистеми та відмовостійкості	44
4.4. Валідація інтерфейсу користувача та каруселі сторінок.....	45
4.5. Верифікація обміну за протоколом Modbus RTU	47
4.6. Конфігурування робочих параметрів інвертора	48
4.7. Візуалізація потоків енергії в реальному часі (PowerFlow).....	49
Розділ 5. Охорона праці	51

5.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів	51
5.2. Технічні та організаційні заходи безпеки при розробці та експлуатації	52
5.3. Пожежна безпека	53
5.4. Безпека в надзвичайних ситуаціях (НС)	54
Висновки до розділу	55
Висновки	57
Список використаних джерел	58
Додаток А	63
Програмне забезпечення МК	63
Додаток Б	77
Файл diagram.json Wokwi	77

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

АКБ – акумуляторна батарея;

ЕС – сонячна електростанція;

BMS (Battery Management System) – система керування акумулятором;

SoC (State of Charge) – рівень заряду акумулятора;

PV (Photovoltaic) – фотоелектричний масив (сонячні панелі);

Edge Computing – периферійні обчислення;

Modbus RTU – промисловий протокол обміну даними через послідовні лінії;

OTA (Over-the-Air) – бездротове оновлення програмного забезпечення;

UART – універсальний асинхронний приймач-передавач;

I2C – послідовна шина даних для зв'язку між інтегральними схемами.

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Скорочення	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми. Ефективне функціонування гібридних сонячних електростанцій безпосередньо залежить від точності та оперативності отримання телеметричних даних. Сучасні комерційні хмарні платформи (SolisCloud, FusionSolar тощо) мають суттєвий недолік – високу дискретність передачі даних (зазвичай 5 хвилин), що не дозволяє фіксувати короточасні перехідні процеси та оперативно керувати навантаженням. Це обумовлює потребу в розробці локальних edge-контролерів, здатних опитувати реєстри інвертора з субсекундною частотою.

Мета роботи – розробка комунікаційного пристрою для автоматичного зняття телеметрії з гібридного інвертора Must PH1800, її локальної візуалізації та інтеграції в мережу Wi-Fi.

Об'єкт дослідження – системи моніторингу та енергоменеджменту гібридних сонячних електростанцій.

Предмет дослідження – апаратно-програмні засоби збору та обробки даних з інверторного обладнання за протоколом Modbus RTU.

Для досягнення мети вирішено наступні завдання:

Проаналізовано архітектури систем збору даних та фізичні інтерфейси телеметрії.

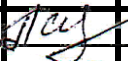
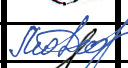
Обґрунтовано вибір компонентної бази та розроблено схему гальванічно ізольованого інтерфейсу обміну.

Спроековано архітектуру ПЗ на базі подійно-орієнтованої моделі ESPHome.

Створено обчислювальні лямбда-функції для розрахунку показників енергоефективності безпосередньо на пристрої.

Проведено тестування працездатності системи на віртуальному стенді.

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Вступ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р1			
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата				
Розробник		Палькевич О. В.			Аналіз існуючих рішень	Літ.	Арк.	Аркуші
Консультант							8	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Трибулькевич С.Л.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

1.1. Архітектура систем збору даних та фізичні інтерфейси телеметрії

Ефективне функціонування гібридних сонячних електростанцій (СЕС) безпосередньо залежить від точності та оперативності отримання телеметричних даних.[1, 2] Сучасна архітектура систем моніторингу об'єднує три взаємопов'язані рівні: первинне апаратне забезпечення (датчики та вимірювальні пристрої інвертора), комунікаційні модулі (шлюзи передачі даних) та аналітичні платформи (хмарні сервери або локальні контролери).[1, 3]

Первинні вимірювання здійснюються безпосередньо силовими платами інвертора з високою дискретністю (кожні кілька секунд) та накопичуються у внутрішньому енергонезалежному буфері.[1] Ця локальна пам'ять гарантує збереження даних у разі збоїв зв'язку.[1] Залежно від виробника інвертора, ємність буфера дозволяє зберігати інформацію від 24 годин до кількох тижнів, виконуючи автоматичну ретроспективну синхронізацію після відновлення мережевого з'єднання.[1]

Для збору повного спектра телеметрії використовуються додаткові апаратні компоненти:

- Трансформатори струму (СТ Clamps): аналогові вимірювальні затискачі, що монтуються безпосередньо на вхідні силові кабелі загальної мережі.[1] Вони фіксують величину та фазовий зсув струму, уможливллюючи точний розрахунок власного споживання об'єкта та забезпечуючи роботу алгоритмів обмеження генерації в мережу («zero-export»).[1, 4, 5]

- Розумні двонаправлені лічильники (Smart Meters): цифрові пристрої (наприклад, серії Fronius Smart Meter або Solis-EPM-5G), що передають дані безпосередньо до інвертора за допомогою диференційних ліній зв'язку.[4, 6] Вони зчитують повний спектр електричних параметрів, необхідних для коректного розподілу потоків енергії.[4]

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

При проектуванні та налаштуванні гібридних систем важливим фактором є резервування потужності інвертора. Інженерний стандарт вимагає вибору потужності інвертора на 20–30% вище від номінальної потужності фотоелектричного поля (PV) для забезпечення майбутнього розширення та компенсації пікових перевантажень.[2] Коефіцієнт корисної дії (ККД) сучасних гібридних інверторів за стандартами CEC (California Energy Commission) варіюється в межах 95–99%.[2] Розрахунок втрат енергії за середній 25-річний життєвий цикл CEC демонструє, що встановлення преміального інвертора з підвищеним ККД повністю окупає різницю у вартості вже за 8–12 років експлуатації.[2]

Для забезпечення надійного транспортування телеметрії комунікаційні модулі використовують послідовні інтерфейси зв'язку.[1, 6, 7] Порівняльні характеристики найбільш поширених апаратних засобів наведено у таблиці 1.1.

1.2. Порівняльний аналіз хмарних систем та локальних edge-контролерів

При виборі архітектури моніторингу розробники систем змушені балансувати між зручністю масштабування, швидкістю отримання даних та рівнем захищеності каналів керування.[3, 11]

Офіційні хмарні платформи (SolisCloud, FusionSolar, ShineServer) забезпечують віддалену доступність з будь-якої географічної точки без необхідності розгортання та адміністрування локальної ІТ-інфраструктури.[1, 11] Вони надають готові інструменти аналітики та довгострокове зберігання даних (від 3 до 10 років), що є критичним вимогам для корпоративного сектору, зокрема для звітності ESG (Bursa ESG), розрахунку енергетичних балансів за стандартом ISO 50001 або сертифікації за екологічними стандартами GBI / Green Mark.[12]

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Порівняльні характеристики найбільш поширених апаратних засобів

Модель пристрою / Модуль	Фізичні інтерфейси	Використовувані мікросхеми та захист	Максимальна дальність зв'язку	Особливості живлення та сумісність
Solis S1-W4G-ST	Wi-Fi / 4G Cellular	Промисловий стільниковий модем, світлодіодна індикація статусів [6]	Обмежено покриттям стільникової мережі	Внутрішнє живлення від порту інвертора
Solis S2-WL-ST	Wi-Fi / Ethernet (LAN)	Апаратне резервування каналів, Plug-and-Play [6]	До 100 м (LAN), залежить від Wi-Fi сигналу	Внутрішнє живлення, швидке підключення
Solis S5-WiFi-ST	Wi-Fi / Bluetooth	Bluetooth-чип для локального пусконаладження [6]	До 10 м (Bluetooth для налаштування) [6]	Живлення від COM-порту інвертора
Waveshare Industrial USB to RS485	USB-A (Host) на RS485 (Terminal)	Оригінальні FT232RNL / FT232RL та SP485EEN; 600W грозозахист, 15KV ESD	До 1.2 км при низьких швидкостях передачі	5V DC безпосередньо від USB-порту хоста
Waveshare RS232/485 to Wi-Fi/ETH-B	RS232, RS485, Wi-Fi, Ethernet	Промисловий алюмінієвий корпус; захист від переполюсовки, ESD, імпульсних завад (Surge/EFT)	До 1.2 км (RS485), Wi-Fi за стандартами AP/STA	Широкий діапазон 6–36V DC або опціональне PoE (802.3af)

Однак ключовим недоліком хмарних систем є дискретність передачі даних, яка зазвичай становить 5 хвилин.[1, 12] Оскільки інвертор передає миттєвий знімок стану системи, а не інтегральне середнє значення за інтервал, будь-який короточасний перехідний процес (наприклад, пуск насоса або швидка зміна хмарності) може спотворити аналітику.[13] Наприклад, при увімкненні потужного навантаження інвертор за кілька мікросекунд коригує свою потужність, але якщо в цей момент відбувається зняття телеметричного знімка, на хмарному графіку відобразиться аномальний пік споживання з мережі тривалістю 5 хвилин.[13] Це ускладнює діагностику та призводить до помилкових висновків про некоректну роботу СЕС.[13]

Локальні edge-контролери (наприклад, SolarAssistant або системи під управлінням Venus OS від Victron Energy) усувають ці недоліки, забезпечуючи опитування регістрів з частотою до 1 секунди.[3, 14] Така швидкість реакції дозволяє створювати високоефективні алгоритми локального керування навантаженням.[3, 15, 16]

Для ілюстрації практичної цінності такої телеметрії можна розглянути сценарій превентивного керування СЕС у регіонах із нестабільним енергопостачанням (наприклад, під час сезону дощів у Західній Африці).[3] Отримавши прогноз про тривалу відсутність сонячної генерації, локальний контролер може автоматично змінити режим роботи інвертора та примусово зарядити батареї від мережі до настання негоди, запобігаючи глибокому розряду акумуляторів.[3]

Локальні системи також пропонують широкі можливості для гнучкого налаштування та автоматизації:

- SolarAssistant: Працює на базі одноплатних комп'ютерів (Raspberry Pi або Orange Pi), надаючи повністю автономний веб-інтерфейс та вбудований MQTT-міст для зв'язку з екосистемою розумного будинку (Home Assistant) або автомобільними зарядними станціями (evcc).[3, 14, 17] Одноразова

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ліцензія на програмне забезпечення коштує \$59, а вартість оновлень після дворічного періоду становить близько \$14 на рік або \$24 за два роки.[18, 19, 20] Також постачаються готові апаратні комплекти на базі Orange Pi вартістю 179–229.[17, 18]

– Venus OS: Програмне забезпечення від Victron Energy з відкритим вихідним кодом.[21, 22] Версія «Venus OS Large» інтегрує середовища Node-RED (візуальне програмування логіки реле та сценаріїв навантаження на порту 1881) та Signal K (стандарт передачі даних для морського та мобільного сектору).[16, 22] Моніторинг підтримує роботу з фірмовою базою даних Grafana та відправку телеметрії на портал VRM.[21, 22]

Схемотехніка та програмна інтеграція локальних контролерів на базі мікроконтролерів

Для розгортання бюджетних та енергоефективних систем локальної телеметрії часто використовуються мікроконтролери сімейства ESP32 або ESP8266, прошиті за допомогою конструктора ESPHome.[15, 27, 28] Фізична реалізація такого інтерфейсу вимагає узгодження логічних рівнів, оскільки безпосереднє підключення шини RS485 до виводів мікроконтролера є неприпустимим через високі рівні напруги (до 5V і більше), що гарантовано призведе до виходу з ладу GPIO-портів.[29]

Типова схема підключення ESP32 до інвертора через трансивер RS485 (на базі мікросхем MAX485 або SP3485) передбачає наступне з'єднання:

- Вивід RO (Receiver Output) трансивера з'єднується з апаратним портом RX мікроконтролера (наприклад, GPIO16 / RX2).[15]
- Вивід DI (Driver Input) з'єднується з портом TX мікроконтролера (наприклад, GPIO17 / TX2).[15]
- Об'єднані виводи керування напрямком передачі RE (Receiver Enable, інверсний) та DE (Driver Enable, прямий) підключаються до будь-якого вільного GPIO (наприклад, GPIO4) для реалізації напівдуплексного режиму роботи.[15]

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		13

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика платформ моніторингу

Платформа моніторингу	Періодичність опитування та передачі	Глибина архіву даних	Підтримувані протоколи зв'язку	Можливості локальної та хмарної автоматизації
SolisCloud	5 хвилин	До 5 років у хмарі	HTTP, HTTPS, Web API	Оповіщення через Push/Email/SMS, базове керування режимами АКБ
FusionSolar	5 хвилин	До 10 років у хмарі	Власний хмарний API, Modbus TCP (обмежено)	Інтелектуальна аналітика стрінгів, SmartGuard AI-сповіщення
ShineServer	5 або 15 хвилин	3 роки в хмарі, 7 днів локально	Власний протокол Growatt, TCP/IP	Налаштування базових параметрів та сповіщень про аварії
Victron VRM	15 секунд	Необмежено в хмарі, 48 годин на шлюзі	MQTT (TCP/SSL), REST API, dbus-flashmq	Повний віддалений контроль параметрів ESS, запуск генераторів, керування реле
SolarAssistant	Субсекундний (< 1 секунди)	Необмежений локальний архів на карті SD	MQTT Broker/Bridge, REST API, WebSocket	Повний локальний контроль регістрів, інтеграція з Home Assistant та evcc

– Між лініями диференційної пари А та В безпосередньо біля порту інвертора встановлюється термінальний резистор опором 120 Ом для компенсації відбиття сигналів у довгих лініях зв'язку.[15]

– Обов'язковим є з'єднання сигнальних заземлень (GND) трансивера та інвертора для вирівнювання потенціалів та запобігання синфазним завадам.[27, 28]

Якщо інвертор встановлено в системі, де діє закритий цикл зв'язку (Closed Loop) з акумулятором через шину CAN, фізичний послідовний порт інвертора RS485 може виявитися зайнятим.[26, 28] У такому разі застосовується метод «пасивного читання» (Passive Sniffing).[26, 30] Пристрій моніторингу підключається паралельно до існуючої шини зв'язку між BMS акумулятора та інвертором, аналізуючи трафік обміну без внесення спотворень у лінію.[26, 30]

Для акумуляторів EG4 (моделі LL та Lifepower4) або рішень на базі JK BMS (JK PB BMS) налаштування паралельної роботи вимагає коректного виставлення DIP-перемикачів адресації.[26, 30] Оскільки адреса «1» часто змінює режим роботи BMS на провідний (що конфліктує із зовнішнім моніторингом), адресацію блоків у системі рекомендується починати з адреси «2», залишаючи першу адресу вільною.[26] Фізичний кабель зв'язку Seplos або RJ45 розпаюється за стандартом: контакт 1 – RS485B, контакт 2 – RS485A, контакт 3 – GND.[28, 30]

Програмна реалізація в ESPHome передбачає конфігурацію Modbus-контролера. Прикладом критично важливого налаштування є часове дроселювання запитів для запобігання переповненню буфера інвертора (наприклад, для гібридних моделей Growatt SPH):

modbus:

- id: mod_bus

uart_id: uart_modbus

flow_control_pin: GPIO4

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		15

modbus_controller:

- id: growatt_sph

address: 0x01

modbus_id: mod_bus

setup_priority: -10

command_throttle: 30ms # Мінімальна пауза між командами для запобігання перевантаженню шини

update_interval: 10s # Інтервал опитування основних телеметричних реєстрів

Отримані телеметричні дані використовуються для автоматизації процесів енергоменеджменту.[15] Наприклад, при падінні рівня заряду батареї (SoC) нижче 30% або 50%, контролер через релейні модулі (такі як 8-канальний Modbus RTU модуль або промисловий Waveshare 30-Ch Ethernet Relay) виконує автоматичне відключення другорядних споживачів (бойлери, кондиціонери), продовжуючи час автономної роботи критично важливого навантаження.[15]

При реалізації автономних систем збору даних на базі скриптів (наприклад, на мові PHP з прямим логуванням у CSV-файли на Raspberry Pi) слід пам'ятати про критичне обмеження ресурсів пам'яті.[22] Через високу інтенсивність операцій запису (щохвилинне логування) використання локальної SD-карти призводить до її швидкого зносу та виходу з ладу файлової системи.[22] Інженерний стандарт вимагає перенаправлення потоку даних на зовнішні бази даних (наприклад, MySQL або InfluxDB на віддаленому сервері), залишаючи SD-карту виключно для читання системних файлів у режимі Read-Only.[22]

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

1.3. Локальні проксі-сервери, пропрієтарні протоколи та реверс-інжиніринг

Значна частина сучасного обладнання використовує закриті протоколи передачі даних, що вимагає впровадження спеціалізованих програмних рішень для перехоплення та декодування локального трафіку.[25, 32]

Протокол Solarman V5

Цей пропрієтарний протокол є де-факто стандартом для логерів компаній Deye, Sofar та інших брендів, які використовують мікросхеми Hi-Flying HF-A11.[33, 34] Протокол використовує транспортний рівень TCP (порт за замовчуванням 8899) та дозволяє інкапсулювати стандартні кадри Modbus RTU всередині власних пакетів.[34, 35]

Структура кадру Solarman V5 складається з заголовка довжиною 11 байт, корисного навантаження та термінальної частини [34]:

1. Стартовий байт (Start Byte): Фіксоване значення 0xA5.[34]
2. Довжина (Length): 2 байти, що вказують на розмір корисного навантаження.[34]
3. Код керування (Control Code): 2 байти. Запит на читання/запис регістрів маркується кодом 0x4510, а відповідь від логера – 0x1510.[34]
4. Порядковий номер (Serial): 2 байти, що виступають ідентифікатором транзакції. Перший байт генерується клієнтом довільно і повертається логером без змін, що дозволяє уникнути обробки застарілих або некоректних відповідей.[34]
5. Серійний номер логера (Logger Serial): 4 байти, унікальний ідентифікатор Wi-Fi/LAN стіка.[34]

Корисне навантаження кадру відповіді містить інформацію про час роботи логера з моменту виготовлення (Total Working Time, 4 байти), поточний час аптайму (Power On Time, 4 байти), зсув часу (Offset Time, 4 байти) та безпосередньо тіло відповіді Modbus RTU.[34]

					171.4327ст3.KP.ПЗ.P1	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Варто враховувати апаратну помилку в логерах Deye: пристрій розраховує та додає до кадру відповіді зайві два нульові байти (0x0000), що є наслідком повторного проходження алгоритму обчислення CRC.[34] Програмні бібліотеки (наприклад, rpySolarmanv5) здійснюють автоматичну фільтрацію цих байтів для збереження цілісності Modbus-кадру.[34]

Проксі-сервер Grott

Для інверторів Growatt перехоплення телеметрії найчастіше реалізується за допомогою локального проксі-сервера Grott, розгорнутого в Docker-контейнері.[25, 36, 37] Програма може функціонувати у двох режимах [25]:

- Sniff-режим: Перехоплення мережесих пакетів за допомогою утиліт зняття дампу трафіку.[25, 36] Цей режим вимагає значних апаратних ресурсів хоста та наявності прав суперкористувача (root).[25]

- Проху-режим (рекомендований): Повна емуляція сервера призначення.[25] У налаштуваннях модуля ShineWIFI-X (через локальну веб-панель на IP-адресі 10.10.100.254) замість стандартного домену server.growatt.com прописується IP-адреса хоста з розгорнутим сервером Grott (порт за замовчуванням 5279).[25, 37]

Grott приймає пакет від логера, автоматично дешифрує його (підтримуються протоколи шифрування Growatt), публікує розпарсені дані у MQTT-топіки або базу даних InfluxDB і прозора пересилає оригінальний пакет на офіційні сервери виробника.[25, 38] Це дозволяє зберегти працездатність мобільного застосунку ShinePhone.[25]

Важливою функцією Grott є захист конфігурації: параметр blockcmd = True блокує будь-які спроби віддаленого переконфігурування чи примусового оновлення прошивки інвертора з боку хмари виробника.[25, 38] Проте інженерам слід бути готовими до сумісності: у деяких версіях прошивок ShineWIFI спостерігається баг, коли модуль через кілька хвилин стабільної роботи примусово скидає налаштовану IP-адресу проксі на

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

дефолтну адресу серверів Growatt, що вимагає регулярного моніторингу статусу підключення.[39]

З точки зору локального керування параметрами інверторів Deye, найчастіше використовуються наступні Modbus-реєстри:

Приклад використання holding-реєстрів у ПЗ deye-controller

HoldingRegisters.BMSBatteryCapacity # Реєстр ємності батареї (читання)

WritableRegisters.SellModeSOC3 # Реєстр встановлення цільового SoC для третього часового інтервалу (запис)

WritableRegisters.SwitchOnOff # Реєстр увімкнення інвертора (реєстр 80)

WritableRegisters.GridExportLimit # Реєстр обмеження експорту в мережу

[40]

Запис значення 0 у реєстр 80 (SwitchOnOff) дозволяє повністю вимкнути інвертор, проте це призводить до генерації аварійного сигналу та помилки з кодом F19 (для відновлення нормальної роботи необхідно повернути значення 1).[40] Натомість зміна обмеження струму заряду акумулятора (реєстри 108 або 212) за допомогою функції запису кількох реєстрів (Modbus Function Code 16 / 0x10) виконується безперешкодно та є основним методом динамічного балансування навантаження.[41]

1.4. Кібербезпека та кіберфізичні загрози в промисловій телеметрії

Еволюція сонячної генерації та перехід до концепції розумних мереж (Smart Grid) суттєво підвищили ризики несанкціонованого доступу до систем керування об'єктами відновлюваної енергетики.[42, 43, 44] Кіберфізичний характер інверторного обладнання означає, що наслідки успішної атаки

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		19

виходять далеко за межі втрати даних, безпосередньо впливаючи на фізичний стан енергосистеми.[44]

Яскравим підтвердженням критичності проблеми є відоме дослідження Раяна Кастеллуччі (Ryan Castellucci), який продемонстрував, що за допомогою апаратного сетапу вартістю всього \$70 та протягом 24 годин підготовки зловмисник може отримати несанкціонований доступ до керування сонячними генеруючими потужностями сумарним обсягом понад 200 МВт.[32]

Основними векторами атак на системи телеметрії є:

- Прослуховування відкритого трафіку: Традиційні протоколи Modbus RTU/TCP транслиють дані у відкритому вигляді (Plain Text), що дозволяє легко перехопити параметри мережі або модифікувати пакети.[42, 45]
- Компрометація ОТА-оновлень: Відсутність механізмів перевірки цифрового підпису прошивок (Firmware Signature Verification) дозволяє завантажувати шкідливе програмне забезпечення безпосередньо в пам'ять інвертора.[45, 46]
- Експлуатація відкритих портів: Наявність незахищених інтерфейсів Telnet чи HTTP на зовнішніх інтерфейсах комунікаційних модулів.[45]
- Слабкі політики автентифікації: Використання заводських облікових записів або спільних кабінетів інсталяторів (компрометація одного облікового запису дає доступ до сотень приватних та комерційних СЕС).[42, 45]

На рівні великих енергосистем узгоджена атака на тисячі інверторів (наприклад, одночасна відправка команди на вимкнення генерації в момент максимальної інсоляції) здатна викликати критичний дефіцит потужності, просідання частоти та запуск віялових відключень споживачів.[42, 46]

Для захисту об'єктів розподіленої генерації розроблено стандарт IEEE 1547.3, який регламентує вимоги до кібербезпеки систем накопичення енергії

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

та сонячних електростанцій.[43] Основні інженерні вимоги безпеки наведено в таблиці нижче.

Таблиця 1.3 – Основні інженерні вимоги безпеки

Рівень захисту	Технічна вимога	Опис та механізм реалізації
Апаратний рівень	Secure Boot & Verified Sourcing [45]	Використання FEOC-compliant чіпсетів; запуск виключно перевіреного та підписаного виробником мікрокоду [45]
Програмний рівень	Encrypted Storage & X.509 Identities [45]	Шифрування конфіденційних даних (паролі Wi-Fi, токени); автентифікація логерів за допомогою унікальних криптографічних сертифікатів [45]
Мережевий рівень	VLAN Segmentation & Guest Isolation [43, 45]	Ізоляція CEC в окремому VLAN; заборона комунікації з іншими пристроями локальної мережі; повне вимкнення WPS та використання WPA3 шифрування [43, 45]
Контроль доступу	Outbound-Only Firewalls & VPN Tunnels [45]	Повна заборона вхідних портів (Telnet, HTTP, Modbus TCP); передача даних виключно через вихідні зашифровані тунелі VPN (WireGuard/IPSec) [45]
Моніторинг	Real-time Anomaly Detection [43, 45]	Аналіз логів на наявність підозрілих команд запису; фіксація спроб brute-force атак на локальні веб-інтерфейси [43, 45]

Висновки до розділу

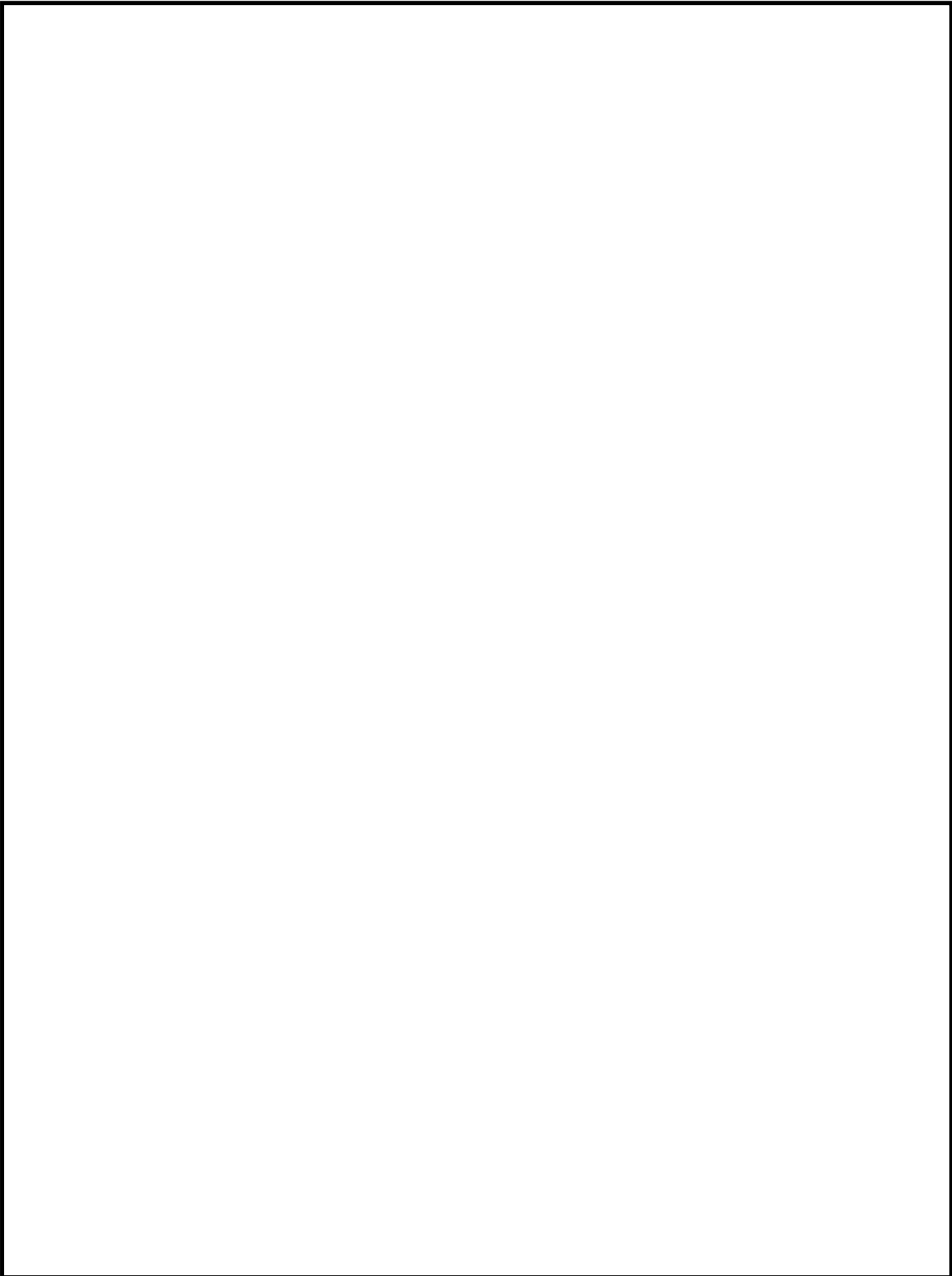
Аналіз технологічного стека систем телеметрії гібридних інверторів демонструє чітку тенденцію переходу від класичних закритих хмарних

платформ до локальних гібридних систем моніторингу (Edge Computing).[3, 11] Необхідність інтеграції різномірних активів (фотоелектричні системи, системи накопичення енергії, зарядні станції для електромобілів, теплові насоси) вимагає високої щільності та швидкості збору даних, що є неможливим за умов використання стандартних 5-хвилинних хмарних інтервалів.[3, 11]

Для побудови надійної, масштабованої та безпечної системи моніторингу рекомендується впроваджувати edge-контролери (на базі рішень типу SolarAssistant або Venus OS), підключені безпосередньо до послідовних портів інверторів та плат керування батареями (BMS) за допомогою промислових ізольованих інтерфейсів RS485/CAN.[22, 26, 30] Це забезпечує автономність функціонування, усуває залежність від працездатності віддалених серверів виробника та надає інструменти для створення локальних сценаріїв автоматизації в реальному часі.[3, 11]

Особливу увагу слід приділяти кіберфізичній безпеці обладнання.[44] Впровадження суворих правил мережевої ізоляції, використання шифрування транспортного рівня (MQTT over TLS), регулярне оновлення прошивок та використання промислових конвертерів інтерфейсів із захистом від імпульсних завад дозволяє мінімізувати ризики компрометації обладнання та гарантувати стабільну та безпечну експлуатацію СЕС протягом усього життєвого циклу.[2, 8, 45]

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		



					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р2			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробник		Палькевич О. В.			Схемотехніка пристрою	Літ.	Арк.	Аркуші
Консультант							23	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Трибулькевич С.Л.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 2. СХЕМОТЕХНІКА ПРИСТРОЮ

2.1. Загальні положення

Сучасні системи автономного та резервного електроживлення на базі гібридних сонячних інверторів потребують безперервного інтелектуального моніторингу для оптимізації споживання, відстеження стану акумуляторних батарей (АКБ) та оперативного реагування на аварійні режими. Розроблюваний пристрій призначений для автоматичного зняття телеметрії з гібридного інвертора серії Must PH1800, локального відображення критичних параметрів на графічному дисплеї та передачі масивів даних у хмарне середовище або локальні системи домашньої автоматизації (наприклад, Home Assistant) через бездротовий протокол Wi-Fi.

Основними технічними вимогами до схемотехніки пристрою є:

- Промислова надійність зняття даних: забезпечення стійкого зв'язку за протоколом Modbus RTU в умовах високого рівня електромагнітних завад, що створюються силовими ключами інвертора.
- Енергоефективність та обчислювальна потужність: здатність одночасно обробляти великі масиви Modbus-регістрів, керувати графічним інтерфейсом користувача та підтримувати шифровані сесії API/OTA.
- Автономність архітектури: локальне збереження працездатності, сканування датчиків та відображення даних на дисплеї навіть у разі тимчасової відсутності зв'язку з локальною мережею Wi-Fi.

2.2. Опис функціональних блоків та їх взаємозв'язків

Архітектура пристрою побудована за модульним принципом навколо центрального обчислювального ядра – однокристальної системи (SoC)

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

ESP32-S2. Функціональну схему пристрою можна розділити на чотири ключові взаємопов'язані блоки:

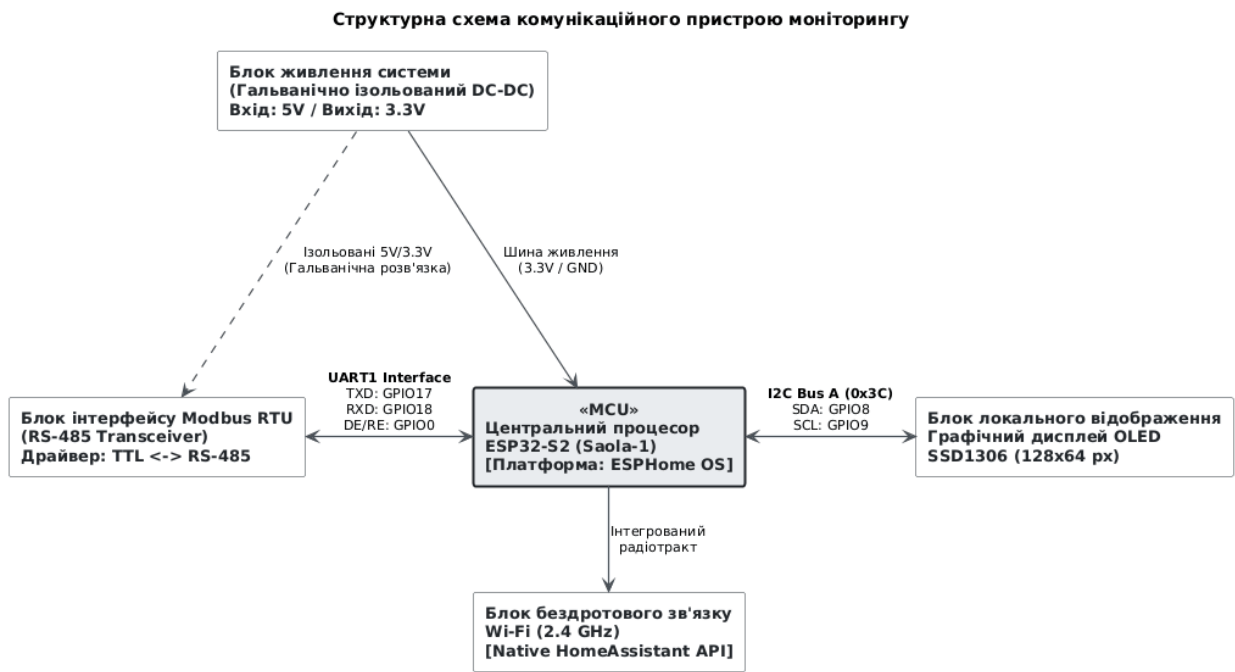


Рисунок 2.1 – Структурна схема

2.2.1. Центральний обчислювальний блок (MCU) виконує роль координатора всієї системи. На базі операційної системи ESPHome він ініціює циклічні запити до holding-регістрів інвертора, здійснює первинну математичну обробку та фільтрацію отриманих даних (наприклад, масштабування з коефіцієнтами multiply: 0.1 для отримання точних значень напруги та струму), обчислює сумарні показники енергії в лямбда-функціях, а також керує динамічним оновленням екранних сторінок.

2.2.2. Блок узгодження промислового інтерфейсу (Modbus RTU / RS-485). Оскільки інвертор Must PH1800 використовує для зовнішньої комунікації протокол Modbus RTU із фізичним рівнем RS-485 (логічна адреса 0x04, швидкість 19200 baud, 8-N-1), а мікроконтролер працює з логічними рівнями TTL (3.3V), цей блок забезпечує дворівневу

конвертацію сигналів. З боку MCU задіяно апаратний периферійний контролер UART, лінії якого призначені на піни GPIO17 (TXD) та GPIO18 (RXD). Для придушення синфазних завад від силових трансформаторів та інверторних стійок, лінія RS-485 реалізується на базі диференціального трансивера з можливістю гальванічної ізоляції шини.

2.2.3. Блок локального відображення даних побудований на базі малогабаритного графічного матричного дисплея з роздільною здатністю 128x64 точок. Взаємодія з процесором відбувається через апаратну послідовну шину I2C (ID: bus_a), де лінія даних SDA підключена до GPIO8, а лінія тактування SCL – до GPIO9. Частота оновлення екрана програмно обмежена індексом update_interval: 1s для уникнення блокування критичних таймерів реального часу. Дисплей працює в режимі каруселі сторінок (зміна кожні 5 секунд), виводячи по черзі:

- Поточний стан інвертора (Work State), напругу та струм АКБ.
- Потужність та напругу сонячних панелей (PV Charger Power/Voltage), добову генерацію.
- Потужність змінного струму в навантаженні (Load Power), відсоток завантаження системи та температуру радіаторів силових ключів.

2.2.4. Блок бездротового зв'язку та живлення інтегрований у SoC радіотракт 2.4 GHz забезпечує підключення до локальної інфраструктури за протоколом 802.11 b/g/n. Програмне ядро підтримує роботу зашифрованого бінарного протоколу Native API Key, що гарантує безпечну інтеграцію з серверами автоматизації без затримок, притаманних протоколу MQTT. Також активовано механізм Captive Portal: у разі втрати зв'язку з основною точкою доступу "HomeNet", пристрій автоматично розгортає власну Wi-Fi мережу аварійного конфігурування ("Esp32-Inverter-Monitor"). Живлення всього пристрою забезпечується стабілізованим джерелом постійного струму через фільтри низьких частот для захисту вимірювальних кіл від імпульсних сплесків.

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

2.3. Обґрунтування та опис компонентної бази системи

Для забезпечення надійної довготривалої експлуатації та мінімізації габаритів пристрою було обрано таку елементну базу:

2.3.1. Мікроконтролер ESP32-S2 (Модуль ESP32-S2-Saola-1). На відміну від застарілих 8-бітних мікроконтролерів, даний чіп базується на 32-бітному однопоточному процесорі Xtensa LX7 із тактовою частотою до 240 MHz.

ESP32-S2-DevKitM-1

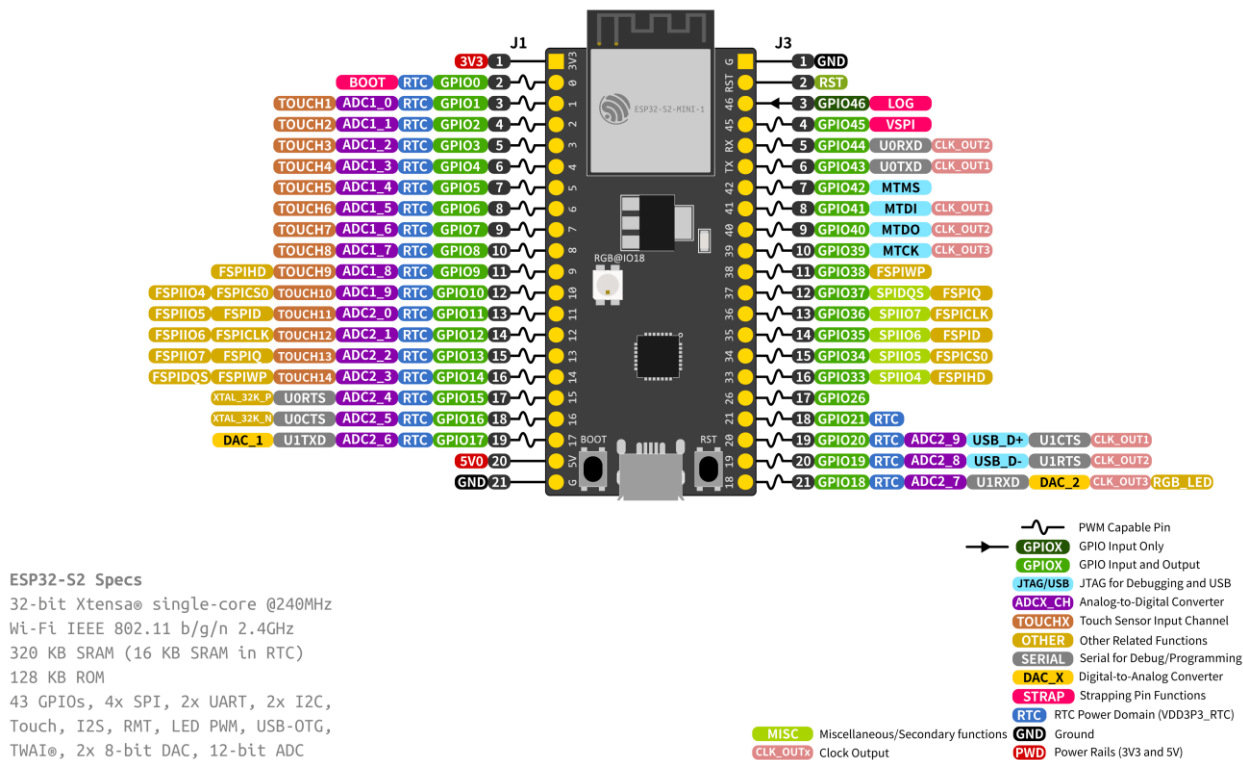


Рисунок 2.2 – Мікроконтролер ESP32-S2

Наявність великого об'єму оперативної пам'яті (320 КБ SRAM) та вбудованого апаратного криптографічного прискорювача дозволяє без затримок підтримувати протокол шифрування API (AES-GCM), обробляти векторні шрифти та динамічно виділяти буфери під Modbus-пакети. Наявність гнучкого матричного комутатора пінів (Matrix IO) дозволяє призначити апаратні інтерфейси UART та I2C на будь-які зручні для

розведення плати виводи (в нашому випадку GPIO17, 18 для UART та GPIO8, 9 для I2C).

2.3.2. Графічний дисплей OLED SSD1306 (128x64) – монохромний дисплей із діагоналлю 0.96 дюйма побудований на базі технології органічних світлодіодів.

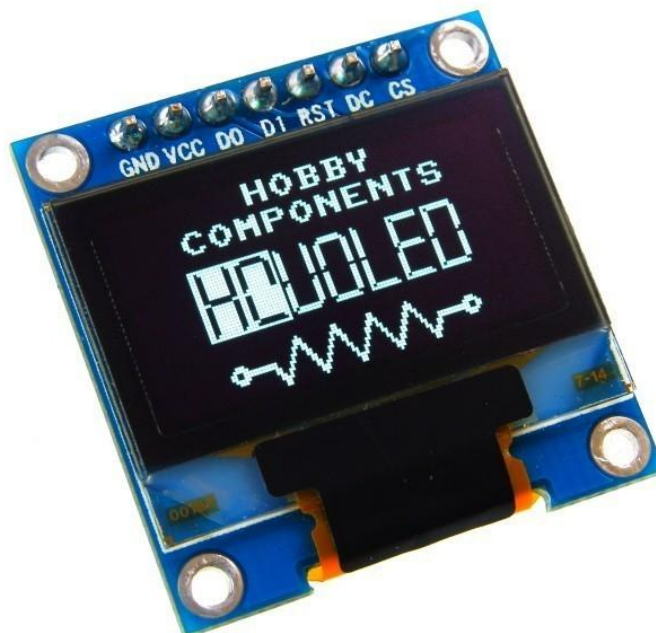


Рисунок 2.3 – Графічний дисплей OLED SSD1306

На відміну від стандартних рідкокристалічних індикаторів (наприклад, LCD1602), OLED-дисплей не потребує окремого підсвічування, має кути огляду до 160° та наднизьке енергоспоживання (струм споживання залежить від кількості підсвічених пікселів і в середньому становить не більше 15–20 мА). Контролер SSD1306 підтримує пряму адресацію через I2C на стандартній адресі 0x3C, що значно спрощує схемотехніку (потребує лише два сигнальних провідники із підтягуючими до шини 3.3V).

2.3.3. Трансивер RS-485 (Драйвер інтерфейсу). Для фізичного підключення до Modbus-порту інвертора Must обирається мікросхема-трансивер промислового класу (наприклад, MAX3485 або ізольований аналог ADM2483).

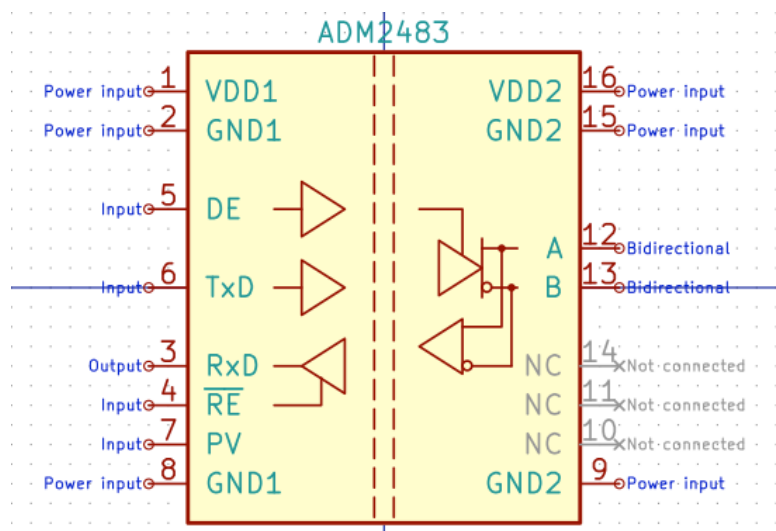
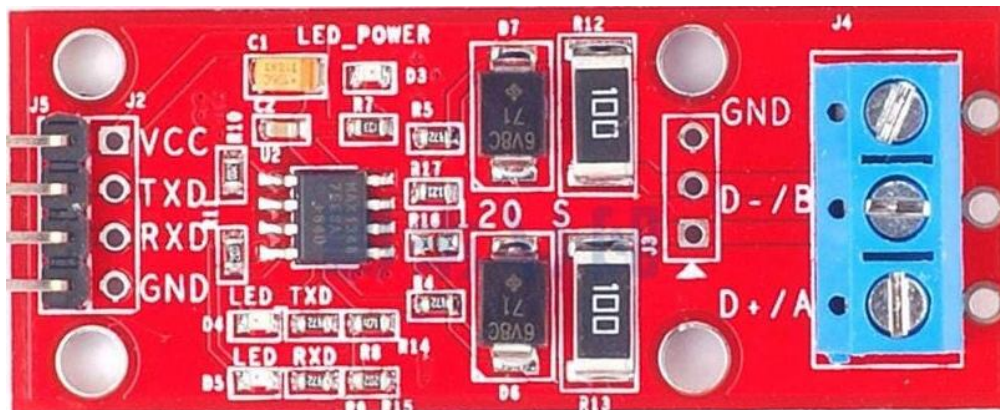


Рисунок 2.4 – Трансивер RS-485

Дані чипи розраховані на роботу з логікою 3.3V, повністю сумісні з рівнями ESP32-S2 і забезпечують швидкість передачі даних до 250 kbps, що з запасом перекриває налаштування інвертора (19200 bps). Пристрій підтримує диференціальний захист ліній A і B від сплесків високої напруги за допомогою TVS-діодів (супресорів) та потребує встановлення узгоджувального резистора-термінатора (ЕОЛ) на кінцях лінії зв'язку для запобігання відбиттю сигналу.

2.4. Схемотехніка інтерфейсу обміну

Для забезпечення надійного зняття телеметрії з гібридного сонячного інвертора в умовах інтенсивних високочастотних завад, що виникають під час комутації силових MOSFET/IGBT ключів, розроблено спеціалізований

ізолюваний інтерфейс обміну даними. Фізичний рівень лінії зв'язку базується на стандарті RS-485 (Modbus RTU), а логічний рівень з боку мікроконтролера керується апаратним периферійним модулем UART1 сокету ESP32-S2.

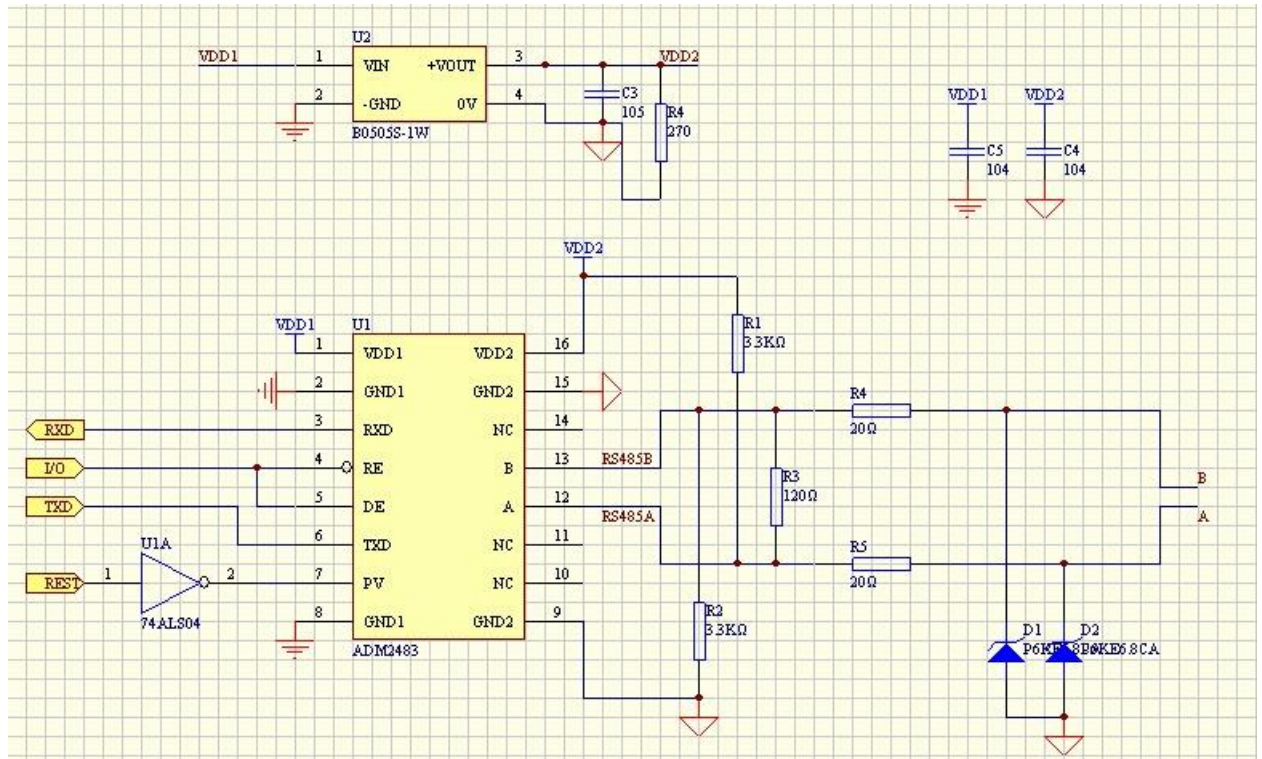


Рисунок 2.5 – Схемотехніка інтерфейсу обміну

Пряме підключення низьковольтних ліній мікроконтролера до загальної шини (GND) інвертора суворо заборонено через ризик виникнення «земляних петель» та синфазних перенапруг, які здатні миттєво знищити обчислювальне ядро. Захист реалізовано за допомогою трирівневої структури:

– Гальванічна ізоляція каналів даних: Виконується на базі високошвидкісного цифрового магнітного або оптичного ізолятора (наприклад, мікросхеми серії ADuM1201 або 6N137). Він повністю розриває фізичний провідниковий зв'язок на лініях TXD та RXD між ядром ESP32-S2 та трансивером лінії.

- Гальванічна ізоляція живлення каскаду: Реалізована на базі малогабаритного одноватного DC-DC перетворювача з високою мічністю

ізоляції (наприклад, B0505S-1W або B0305S-1W). Він передає потужність (5V або 3.3V) на «брудну» сторону трансивера через магнітне поле трансформатора, виключаючи спільний провідник заземлення.

– Диференціальний захист лінії (TVS-бар'єр): Безпосередньо на виходах лінії зв'язку А і В встановлюються триполюсні супресори (TVS-діодні збірки, такі як SM712). Вони обмежують небезпечні імпульси перенапруги, викликані наведеннями на довгу лінію зв'язку, скидаючи їх на локальне заземлення інвертора.

2.4.1. Функціонування та налаштування апаратного UART

З боку мікроконтролера ESP32-S2 обмін даними забезпечується апаратним периферійним блоком UART1. Відповідно до програмної конфігурації прошивки, інтерфейс має такі параметри:

– Конфігурація пінів (I/O Mux): Передача даних (tx_pin) призначена на GPIO17, прийом даних (rx_pin) – на GPIO18.

– Часові параметри сесії: Швидкість передачі становить 19200 baud. Формат кадру – класичний промисловий стандарт 8-N-1 (8 біт даних, відсутність контролю парності NONE, 1 стоп-біт).

– Керування напрямком потоку (Flow Control): Оскільки стандарт RS-485 використовує напівдуплексний режим (Half-Duplex) по одній крученій парі, трансивер потребує перемикання режимів «Прийом/Передача». За це відповідає виділений пін GPIO0 (flow_control_pin). Коли ESP32-S2 ініціює Modbus-запит, на GPIO0 виставляється високий логічний рівень (команда DE – Driver Enable), переводячи трансивер у режим передачі. Після відправки останнього байта пакета, пін автоматично скидається в нуль (команда RE – Receiver Enable з інверсією), повертаючи пристрій у режим очікування відповіді від Must PH1800.

2.4.2. Схематична обов'язка та узгодження лінії

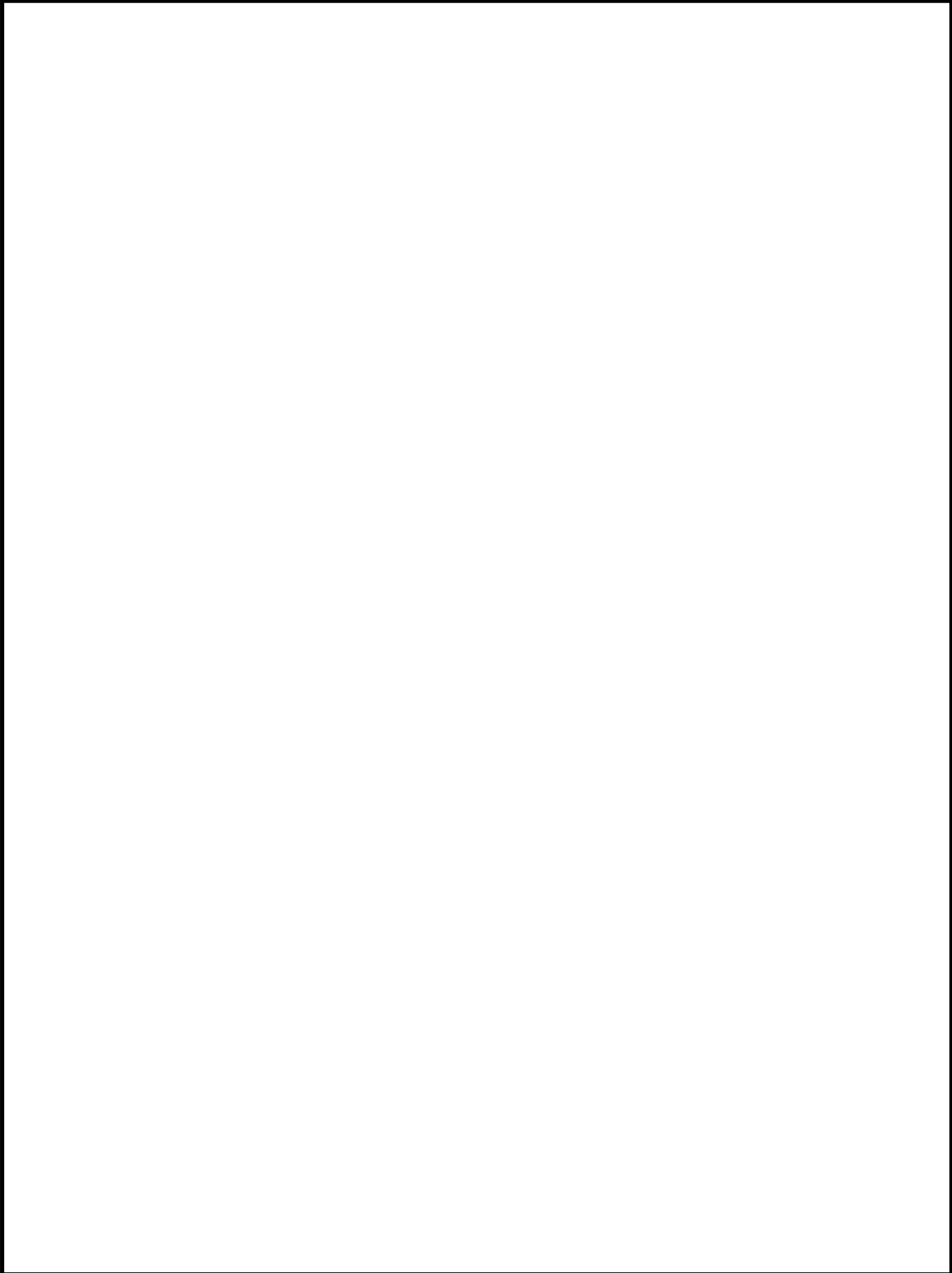
Для запобігання ефекту «відбиття сигналу» (резонансних ехо-хвиль у довгому кабелі), який спотворює цифрові пакети Modbus, на кінцях

					171.4327ст3.KP.ПЗ.P2	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

диференціальної лінії обов'язково встановлюється термінуючий резистор лінії номіналом 120 Ом (ЕОЛ).

Таблиця 2.1 – Зведена таблиця електричних сигналів інтерфейсу обміну

Сигнал	Тип лінії	Рівень напруги	Функціональне призначення
TXD1 (GPIO17)	Вхід ізолятора	3.3V TTL	Цифровий потік даних від ESP32 до інвертора
RXD1 (GPIO18)	Вихід ізолятора	3.3V TTL	Цифровий потік даних від інвертора до ESP32
RTS/DE (GPIO0)	Керування потоком	3.3V TTL	Перемикання трансивера: 1 – передача, 0 – прийом
Line A	Диференціальна пара	RS-485 (до +5V)	Пряма сигнальна лінія промислової шини Modbus
Line B	Диференціальна пара	RS-485 (до 0V)	Інверсна сигнальна лінія промислової шини Modbus
GND_ISO	Ізольоване заземлення	0V (відносне)	Опорний потенціал для трансивера, відсічений ві



					171.4327ст3.КР.ПЗ.РЗ			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробник		Палькевич О. В.			Архітектура програмного забезпечення системи	Літ.	Арк.	Аркуші
Консультант							33	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Трибулькевич С.Л.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 3. АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ

3.1. Архітектура програмного забезпечення та середовище розробки

Програмне забезпечення комунікаційного модуля моніторингу реалізовано на базі компонентно-орієнтованої операційної системи ESPHome, що функціонує поверх фреймворку Arduino Core / ESP-IDF для мікроконтролерів сімейства ESP32. Вибір даної архітектури обумовлений її подійно-орієнтованою моделлю (Event-driven architecture), де кожна периферійна підсистема (UART, I2C, Wi-Fi, Modbus) виконується як незалежний асинхронний компонент у загальному неблокуючому циклі обробки (main loop).

Конфігурування, компіляція та складання бінарного образу прошивки виконувалися в інтегрованому середовищі розробки VS Code з використанням інструментарію компілятора GCC-Xtensa. Емуляція, налагодження та верифікація логіки взаємодії інтерфейсів обміну проводилися у хмарному середовищі автоматизованого проектування Wokwi з використанням мостового шлюзу \$serialForward для трансляції трафіку на локальний емулятор шини Modbus.

3.2. Опис програмних модулів системи

Програмне забезпечення пристрою має чітку модульну структуру і розподілене на три основні функціональні блоки, які обмінюються даними через глобальну карту сутностей (Entity ID) в оперативній пам'яті (SRAM) мікроконтролера.

3.2.1. Модуль драйвера обміну Modbus RTU (modbus_controller)

Даний модуль відповідає за ініціалізацію апаратного інтерфейсу UART1 на пінах GPIO17 (TX) та GPIO18 (RX) і координацію опитування

					171.4327ст3.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

холдинг-регістрів (Holding Registers) інвертора Must PH1800 (логічна адреса пристрою 0x04).

Модуль 1. Циклічне опитування інвертора (Modbus RTU)



Рисунок 3.1 – Модуль драйвера обміну Modbus

Особливості функціонування:

- Оптимізація запитів: Для зменшення навантаження на шину та уникнення затримок, модуль автоматично групує сусідні регістри сонячного чаржера (діапазон 15201–15221) та інверторної частини (25201–25277) у комбіновані Modbus-пакети (функція читання 0x03).
- Керування напівдуплексом: Перемикання напрямку передачі драйвера RS-485 виконується через виділений пін керування потоком GPIO0 (flow_control_pin) у мікросекундному часовому вікні.
- Масштабування даних: Оскільки інвертор передає значення у цілочисельному форматі (Fixed-point), модуль здійснює первинну програмну фільтрацію та нормалізацію за допомогою вбудованих математичних фільтрів (multiply: 0.1) для отримання реальних фізичних величин (В, А, Вт) з плаваючою точкою.

3.2.2. Модуль графічного інтерфейсу та локального виведення

Модуль забезпечує циклічний рендеринг графічної та текстової інформації на OLED-дисплеї SSD1306 через апаратну шину I2C Bus A (GPIO8/SDA, GPIO9/SCL, адреса 0x3C).

Особливості функціонування:

- Економічний рендеринг шрифтів: Для уникнення критичного блокування процесорного часу (що фіксувалося під час симуляції в Wokwi на рівні 274 мс), у модулі застосовано жорстке обмеження набору гліфів для шрифту Roboto та виконано статичне ASCII-мапування промислових іконок Material Design Icons:

Символ 'B' перепризначено на гліф іконки батареї (\U000F008A).

Символ 'S' – на гліф іконки сонячної панелі (\U000F0A18).

Символ 'P' – на гліф іконки блискавки/навантаження (\U000F0254).

- Карусель сторінок (Pages): Програмно реалізовано три логічні сторінки екрана з інтервалом автоматичного перемикання кожні 5 секунд.

					171.4327ст3.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Модуль 2. Керування дисплеєм та каруселлю сторінок (SSD1306)

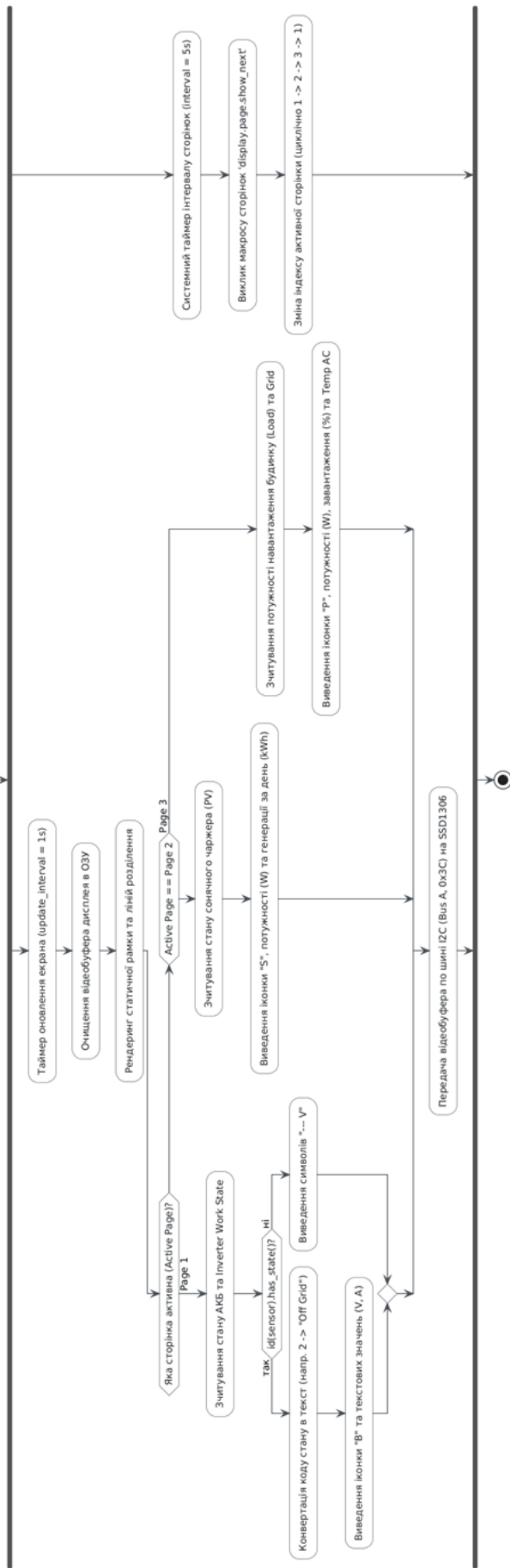


Рисунок 3.2 – Модуль графічного інтерфейсу та локального виведення

– Захист від невизначених станів: Перед виведенням будь-якого параметра виконується логічна перевірка умови `id(sensor_name).has_state()`. Це запобігає виведенню некоректних даних або значень NaN до моменту отримання першої успішної відповіді по Modbus шині.

3.2.3. Модуль мережевої комунікації та відмовостійкості

Модуль керує бездротовим стеком TCP/IP, інтеграцією з Home Assistant та захистом пристрою від повного зависання у разі втрати зв'язку.

Особливості функціонування:

– Шифрований обмін: Передача телеметрії на сервер автоматизації виконується через низьколінійний бінарний протокол Native API із застосуванням стійкого криптографічного ключа AES-GCM-256.

– Бездротове оновлення (OTA): Інтегровано компонент захищеної бездротової прошивки за паролем, що дозволяє модернізувати алгоритми без демонтажу пристрою.

– Аварійний Fallback-режим (Captive Portal): У разі неможливості підключення до основної точки доступу "Wokwi-GUEST" або "HomeNet", таймер компонента wifi ініціює перехід радіомодуля в режим точки доступу (SoftAP). Пристрій розгортає власну мережу "Esp32-Inverter-Monitor" із запуском вбудованого веб-сервера (IP: 192.168.4.1) та DNS-перенаправлення, надаючи користувачеві інтерфейс для аварійного налаштування.

3.3. Реалізація розрахункових лямбда-функцій

Для розрахунку інтегральних показників енергоефективності, які безпосередньо не передаються інвертором у вигляді готових значень, на рівні конфігурації ESPHome реалізовано обчислювальні блоки на мові C++ (лямбда-вирази).

					171.4327ст3.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Модуль 3. Мережевий зв'язок (Wi-Fi, API, Captive Portal)

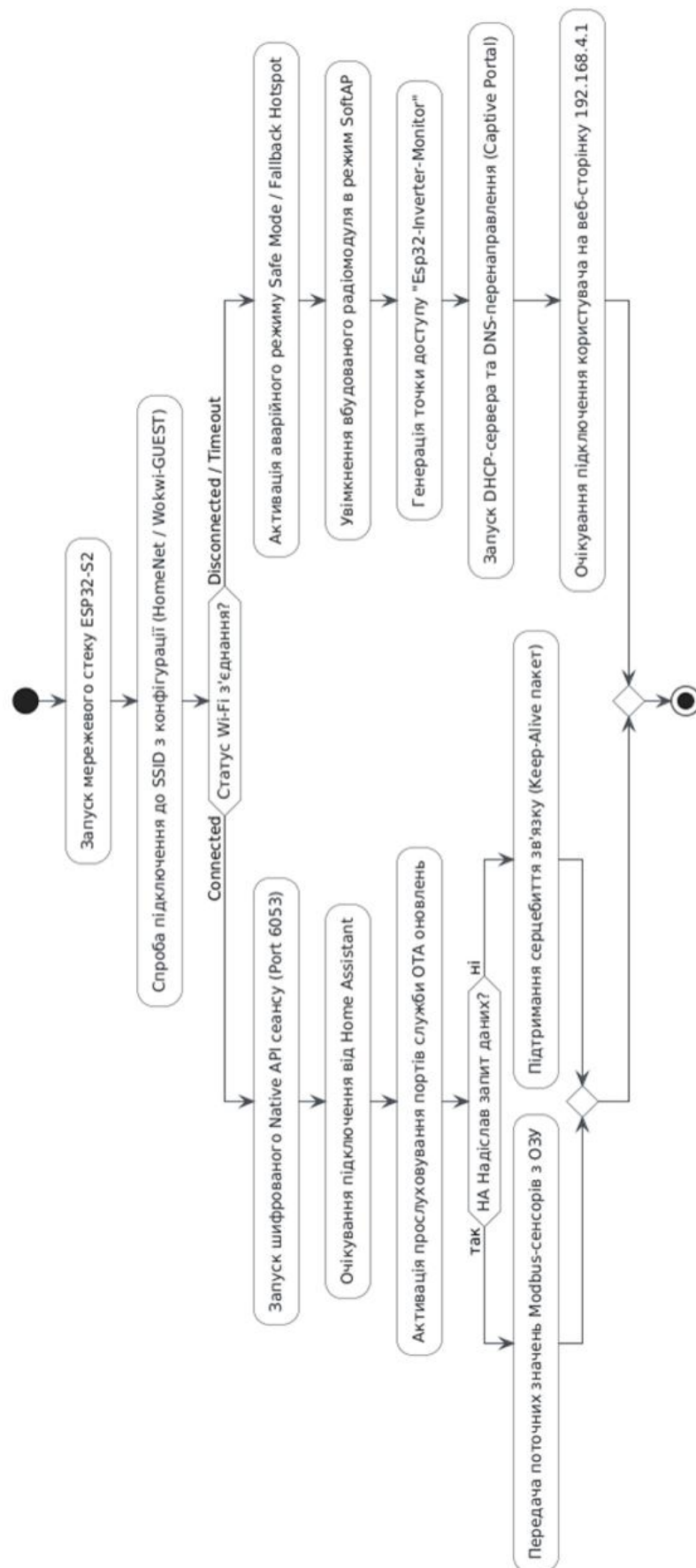


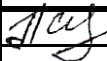
Рисунок 3.3 – Модуль мережевої комунікації та відмовостійкості

Зокрема, накопичена потужність заряду сонячної генерації, енергія розряду АКБ та загальне споживання будинку обчислюються шляхом зняття значень старшого слова масиву МВт-год (mwh) та молодшого слова кВт-год (kwh) з наступним математичним відновленням результуючого профілю:

```
C++
// Приклад програмної реалізації в конфігурації для Accumulated
Charger Power
lambda: !lambda '
    return (id(charger_total_mwh).state * 1000.0 +
id(charger_total_kwh).state);
'
```

Цей підхід дозволяє перенести математичне навантаження з сервера Home Assistant безпосередньо на периферійний обчислювач (Edge Computing), забезпечуючи високу точність обліку енергії за стандартами device_class: energy та state_class: total.

					171.4327ст3.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р4			
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата				
Розробник		Палькевич О. В.			Тестування роботоспроможності	Літ.	Арк.	Аркушіів
Консультант							41	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Трибулькевич С. Д.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 4. ТЕСТУВАННЯ РОБОТОСПРОМОЖНОСТІ

4.1. Методика та програмно-апаратний стенд верифікації

Для перевірки коректності функціонування розробленого комунікаційного пристрою, валідації алгоритмів асинхронного опитування та оцінки стійкості мережевого стеку було розгорнуто комплексний програмно-емульований стенд. З огляду на специфіку інтеграції низьковольтних мікроконтролерних систем із силовими інверторами, первинне тестування безпосередньо на фізичному обладнанні є недоцільним через ризик логічних помилок у коді керування потоком полудуплексу шини RS-485.

Стенд для тестування містить три взаємопов'язані сегменти:

- Емулятор обчислювального ядра (Wokwi): інтегроване середовище, що забезпечує поциклову симуляцію ядра мікроконтролера ESP32-S2 (модуль Saola-1), графічного контролера дисплея SSD1306 та апаратного логера UART0.
- Трансляційний міст даних (Wokwi IoT Gateway): консольна утиліта wokwi-forwarder, яка здійснює двонаправлений прокид (forwarding) симульованого послідовного порту UART1 через WebSocket-з'єднання на локальний віртуальний порт COM1 хост-комп'ютера.
- Емулятор промислової шини (Modbus Slave): спеціалізоване програмне забезпечення, що функціонує на базі пов'язаного віртуального порту COM2 із параметрами зв'язку 19200 bps, 8-N-1. Дане ПЗ імітує карту пам'яті холдинг-регістрів інвертора Must PH1800 (Slave ID: 0x04).

4.2. Аналіз результатів симуляції та завантаження системи

Запуск симуляційного середовища підтвердив повну працездатність програмного комплексу та успішне завершення ініціалізації всіх периферійних модулів (компонентів).

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Загальний вигляд програмно-апаратного стенда в процесі активної симуляції та взаємозв'язок віртуальних компонентів представлено на рис. 4.1.

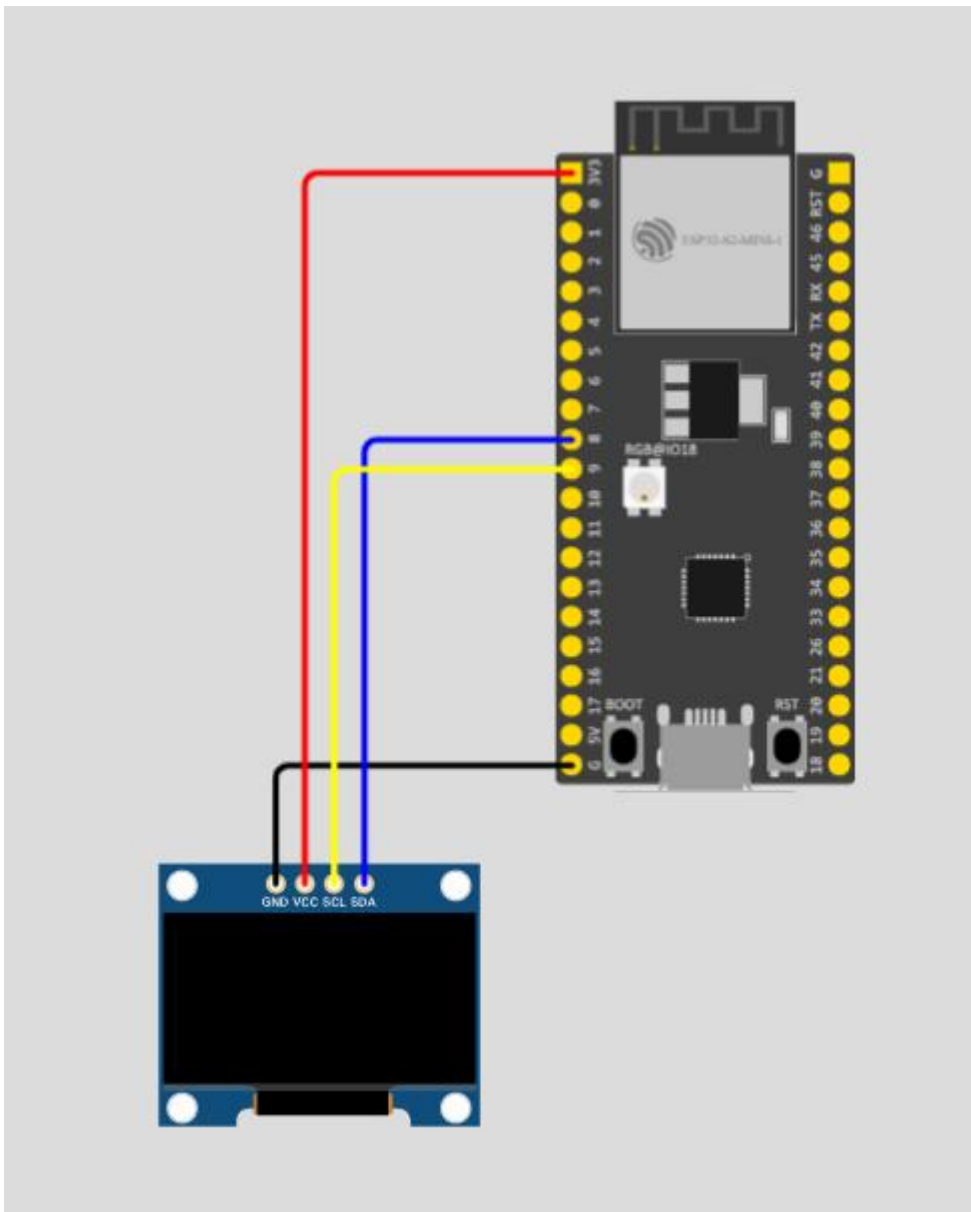


Рисунок 4.1 — Візуалізація топології та процесу симуляції пристрою в середовищі Wokwi

Аналіз логів завантаження первинного завантажувача (ESP-ROM) та операційної системи ESPHome показує наступну хронологію стартів:

– Режим завантаження флеш-пам'яті визначено як SPI_FAST_FLASH_BOOT, тактування та архітектурні дескриптори завантажені успішно.

- Апаратний логер logger успішно ініціалізовано на швидкості 115200 baud (порт UART0, пін GPIO43/44).
- Підсистема I2C (i2c.arduino) здійснила успішну процедуру відновлення шини (Performing I2C bus recovery) та в процесі сканування адресної карти виявила графічний контролер дисплея за адресою 0x3C.

4.3. Тестування мережевої підсистеми та відмовостійкості

Мережевий стек архітектури прошивки перевірявся в умовах підключення до ізольованої бездротової інфраструктури. Відповідно до записів системного журналу, пристрій успішно виконав процедуру сканування ефіру, виявив точку доступу із замапованим BSSID 42:13:37:55:AA:01 (Wokwi-GUEST) та перейшов у статус WiFi Connected!.

Процес успішного підключення до бездротової мережі, ініціалізацію API-сервера та результати апаратного сканування шини I2C зафіксовано на знімку екрана системного монітора (рис. 4.2).

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

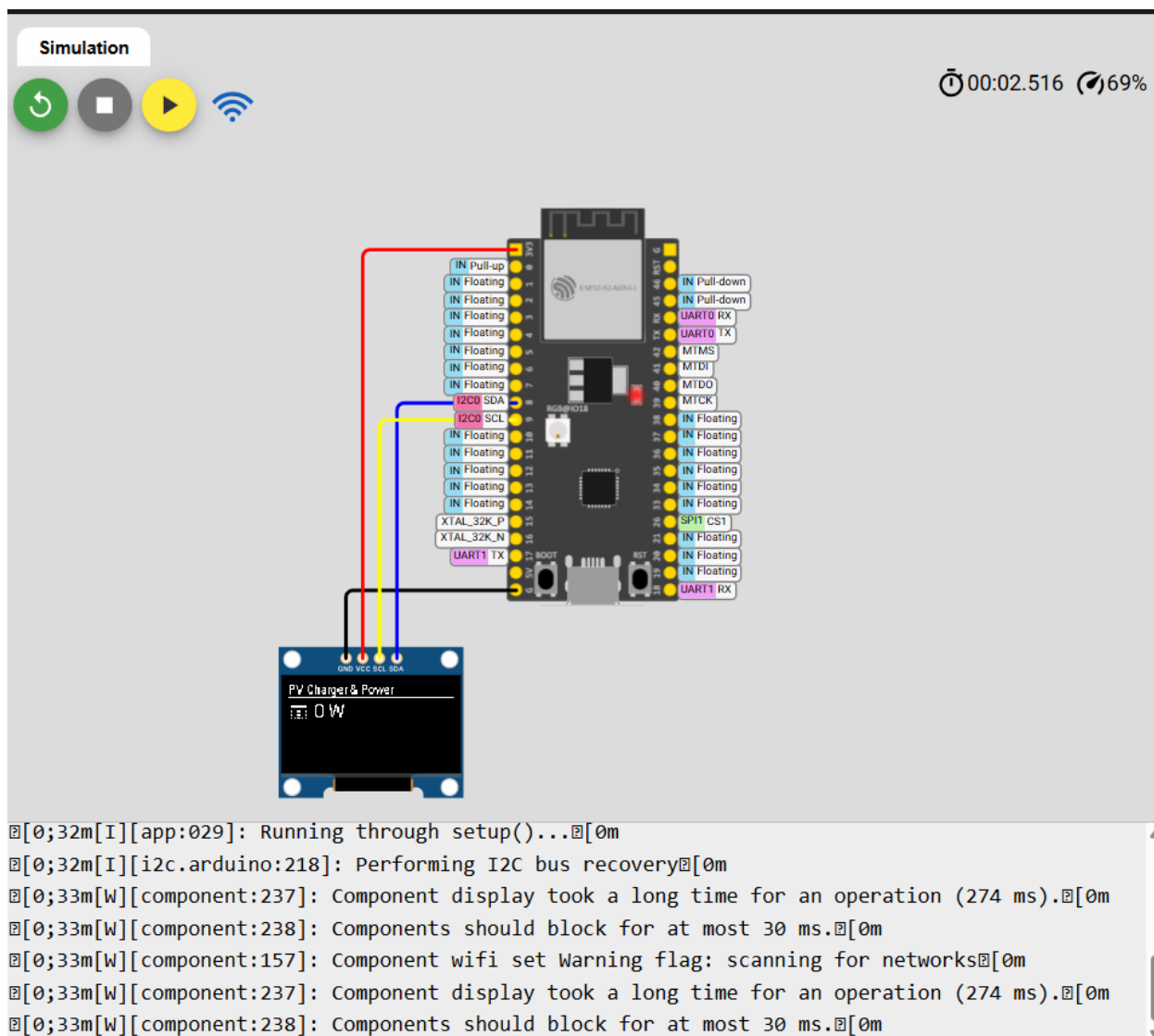


Рисунок 4.2 — Журнал системних логів ESPHome у момент ініціалізації мережі та периферії

Після стабілізації мережевого з'єднання ядро ESPHome успішно скинуло прапорці попередження (Component wifi cleared Warning flag) та перейшло до виконання основного циклу обробки подій, піднявши зашифрований канал Native API для інтеграції з Home Assistant.

4.4. Валідація інтерфейсу користувача та каруселі сторінок

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р4	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		45

Локальний інтерфейс користувача на базі графічного дисплея SSD1306 (128x64) перевірявся на предмет коректності рендерингу текстових рядків та ASCII-мапованих промислових гліфів за умов динамічної зміни станів.

Результати рендерингу трьох послідовних інформаційних сторінок каруселі інтерфейсу наведено на рис. 4.3.

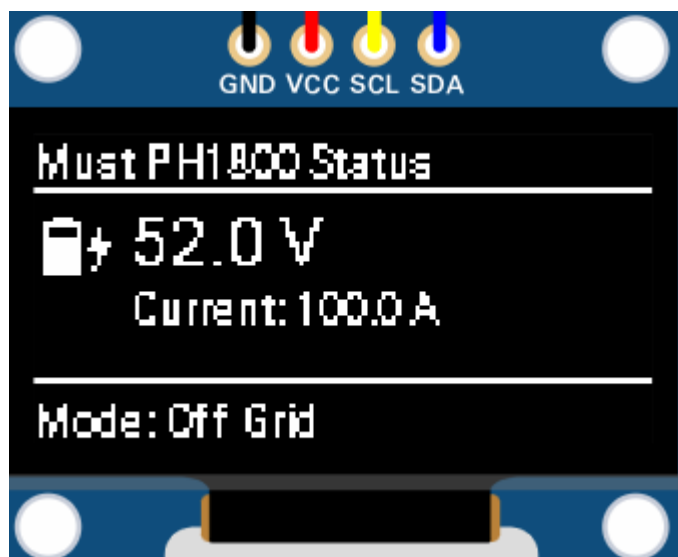


Рисунок 4.3 — Візуалізація циклічних сторінок інтерфейсу користувача на OLED-дисплеї

Сторінка 1: відображає глобальний статус системи (Must PH1800 Status). На базі логічного аналізу коду стану `inverter_work_state`, отриманого від інвертора, система коректно трансліює цифровий код 2 у текстовий рядок режимів Mode: Off Grid (автономна робота від АКБ). Також успішно виводиться іконка батареї (символ B) та поточна напруга.

Сторінка 2: виводить параметри сонячного контролера (PV Charger & Power). Система демонструє миттєву потужність генерації у ватах (іконка S), напругу на фотоелектричних стрингах та інтегральне добове значення виробленої енергії у кВт-год.

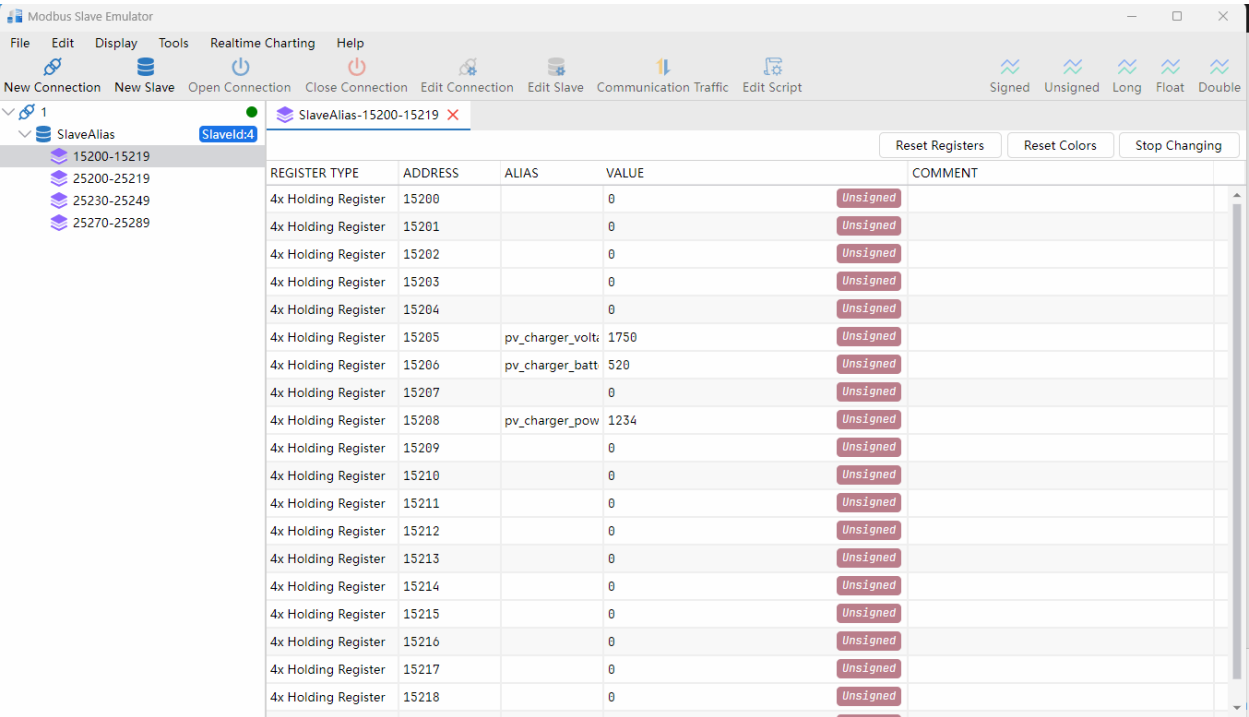
Сторінка 3: призначена для моніторингу змінного навантаження (Inverter Load). На екрані візуалізується поточна потужність споживання локального об'єкта (іконка блискавки P), відсоток загального завантаження

інверторної стійки від номіналу, напруга зовнішньої промислової мережі (Grid, B) та температура силового радіатора інвертора.

4.5. Верифікація обміну за протоколом Modbus RTU

Найбільш критичною частиною тестування стала валідація напівдуплексного протоколу обміну. На початкових етапах симуляції в журналі спостерігалися попередження про дублювання команд (Duplicate modbus command found), викликані автоматичним групуванням неперервних масивів регістрів (наприклад, по адресах 25205, 25237, 15217 тощо). Дана особливість є штатною для архітектури modbus_controller в ESPHome, яка намагається оптимізувати трафік шляхом об'єднання одиночних запитів у групові фрейми (функція читання декількох регістрів).

Після стабілізації черги команд та запуску трансляційного мосту, утиліта Modbus Slave зафіксувала стійкий циклічний обмін даними. Вікно аналізу Modbus-трафіку (Communication Traffic) представлено на рис. 4.4.



The screenshot shows the 'Modbus Slave Emulator' application window. On the left, a tree view shows 'SlaveAlias' with a sub-entry '15200-15219'. The main area displays a table of registers. The table has columns: REGISTER TYPE, ADDRESS, ALIAS, VALUE, and COMMENT. The registers are listed from 15200 to 15218. Most are '4x Holding Register' type. Some have aliases like 'pv_charger_volt', 'pv_charger_batt', and 'pv_charger_pow'. The values are mostly 0, with some specific values like 1750, 520, and 1234. A 'COMMENT' column is present but empty. There are buttons at the top right: 'Reset Registers', 'Reset Colors', and 'Stop Changing'.

REGISTER TYPE	ADDRESS	ALIAS	VALUE	COMMENT
4x Holding Register	15200		0	Unsigned
4x Holding Register	15201		0	Unsigned
4x Holding Register	15202		0	Unsigned
4x Holding Register	15203		0	Unsigned
4x Holding Register	15204		0	Unsigned
4x Holding Register	15205	pv_charger_volt	1750	Unsigned
4x Holding Register	15206	pv_charger_batt	520	Unsigned
4x Holding Register	15207		0	Unsigned
4x Holding Register	15208	pv_charger_pow	1234	Unsigned
4x Holding Register	15209		0	Unsigned
4x Holding Register	15210		0	Unsigned
4x Holding Register	15211		0	Unsigned
4x Holding Register	15212		0	Unsigned
4x Holding Register	15213		0	Unsigned
4x Holding Register	15214		0	Unsigned
4x Holding Register	15215		0	Unsigned
4x Holding Register	15216		0	Unsigned
4x Holding Register	15217		0	Unsigned
4x Holding Register	15218		0	Unsigned

Рисунок 4.4 — Моніторинг структури бінарних пакетів Modbus RTU у вікні утиліти Modbus Slave

Як свідчить аналіз трафіку на рис. 4.4, мікроконтролер надсилає чітко структуровані запити (пакети Rx для емулятора), які починаються з адреси пристрою 04 та коду функції 03 (Read Holding Registers), вказуючи початкову адресу регістру та їхню кількість (наприклад, 04 03 3В 61 ...). Емулятор інвертора Must у відповідь формує пакети Tx, що містять масив запитаних байт та апаратну контрольну суму CRC-16.

Стабільна поява відповідей у вікні емулятора та відсутність помилок тайм-ауту або спотворення контрольних сум (Frame Errors) підтверджує правильність схемотехнічного вибору параметрів зв'язку, коректність таймінгів `send_wait_time: 500ms` та `command_throttle: 300ms`, а також повну готовність розробленого пристрою до інтеграції з реальним промисловим обладнанням сонячної генерації.

4.6. Конфігурування робочих параметрів інвертора

На рис. 4.5 представлено інтерфейс віддаленого налаштування ключових констант та режимів роботи гібридного інвертора Must PH1800.

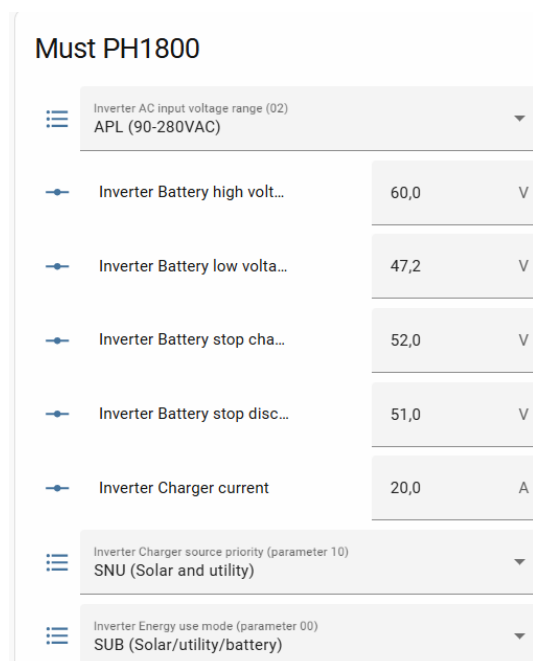


Рисунок 4.5 — Інтерфейс конфігурування параметрів Must PH1800

4.7. Візуалізація потоків енергії в реальному часі (PowerFlow)

На рис. 4.6 наведено мнемосхему розподілу потоків потужності (PowerFlow) у системі, що відображає поточний енергетичний баланс та стан вузлів перетворення.

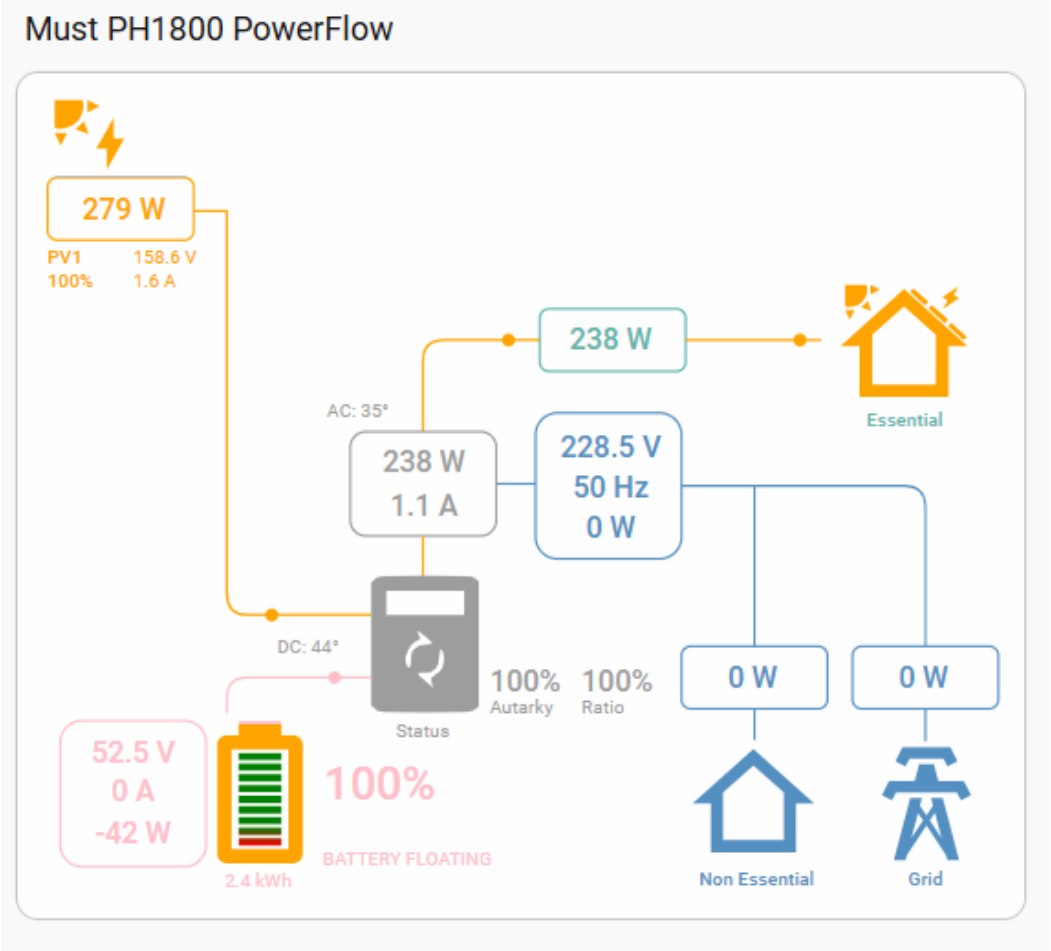
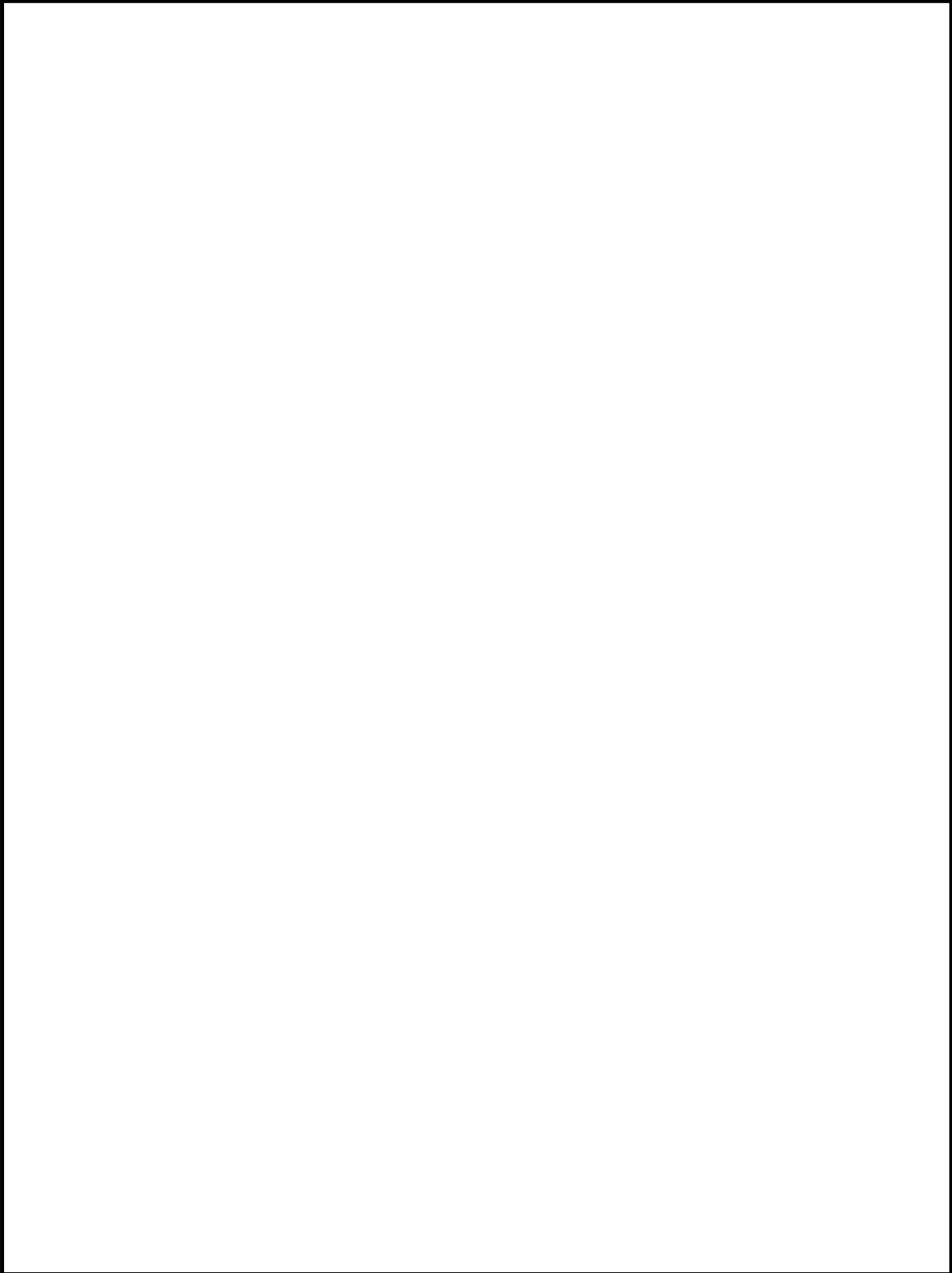


Рисунок 4.6 — Карта потоків потужності (PowerFlow) інвертора Must PH1800

Поточна потужність масиву сонячних панелей становить 279 W. Рівень заряду АКБ (SoC) становить 100%, ємність за моніторингом — 2.4 kWh. Батарея перебуває в режимі підтримки напруги буферного заряду (BATTERY FLOATING). Напруга на клеммах становить 52.5 V, струм заряду дорівнює 0 A, а загальний баланс потужності по DC-шині батареї має мінімальне компенсаційне значення -42 W. Текуча температура DC-каскаду становить 44°C.



					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р5			
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата				
Розробник		Палькевич О. В.			Охорона праці	Літ.	Арк.	Аркуші
Консультант		Губальцев А. М.					50	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Трибулькевич С.Л.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі розглядаються питання забезпечення безпечних умов праці на етапах розробки, налагодження та експлуатації мікропроцесорного пристрою моніторингу гібридного інвертора. Робота пов'язана з проектуванням цифрових електронних схем, програмуванням, а також із проведенням вимірювань у колах з небезпечною для життя напругою (каскади постійного струму АКБ та фотоелектричних панелей, лінії змінного струму 220 В).

5.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Відповідно до ДСТУ 12.0.003-74, процес розробки та обслуговування пристрою моніторингу супроводжується дією таких основних факторів:

5.1.1. Фізичні небезпечні та шкідливі фактори:

- Підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може статися через тіло людини. Оскільки пристрій інтегрується в гібридний інвертор, розробник має справу з напругою змінного струму промислової частоти (220 В, 50 Гц), напругою DC-шини акумуляторів (від 48 В до 60 В) та високою напругою постійного струму від фотоелектричних масивів (PV-вхід, до 150–450 В).
- Підвищена температура поверхонь обладнання. Силкові елементи інвертора (транзистори інверторного каскаду, силкові трансформатори, дроселі) та компоненти блоку живлення пристрою моніторингу під час тривалої роботи під навантаженням нагріваються, що створює ризик термічних опіків.
- Підвищений рівень електромагнітних випромінювань. Високочастотна комутація силових ключів інвертора є джерелом значних ЕМП радіочастотного діапазону.
- Недостатня освітленість робочої зони або підвищений рівень блискучості, що призводить до швидкої втомлюваності зорового аналізатора під час монтажу дрібних SMD-компонентів.

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р5	Арк.
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		51

5.1.2. Хімічні шкідливі фактори:

Виділення шкідливих речовин в атмосферу робочої зони. Під час паяння компонентів пристрою моніторингу (мікроконтролерів, інтерфейсних мікросхем, гальванічних розв'язок) виділяються аерозолі свинцю (при використанні свинцевих припоїв) та продукти термічного розпаду флюсів (каніфолі), які є токсичними та алергенними.

5.1.3. Психофізіологічні фактори:

Нервово-психічне перенапруження (розумове перенапруження, перенапруження зорових та слухових аналізаторів під час програмування, трасування друкованих плат та пошуку апаратних помилок).

5.2. Технічні та організаційні заходи безпеки при розробці та експлуатації

Для нейтралізації виявлених небезпечних факторів впроваджується комплекс інженерно-технічних рішень.

5.2.1. Електробезпека

Електроустановка відноситься до класу споруд напругою до 1000 В. Для захисту персоналу згідно з ДСТУ Б В.2.5-82:2016 передбачено:

– Гальванічна розв'язка інтерфейсів. Оскільки пристрій моніторингу підключається до внутрішніх шин інвертора або інтерфейсів передачі даних (RS-485/Modbus), лінії зв'язку з обчислювальною мережею або ПК розробника обов'язково ізолюються за допомогою цифрових ізоляторів (наприклад, серії ISO або оптичних розв'язок). Це унеможливило виведення високого потенціалу на інтерфейсні роз'єми та органи керування.

– Захисне заземлення та занурення. Корпус гібридного інвертора та вимірювальні стенди жорстко підключаються до контуру захисного заземлення з опором не більше 4 Ом.

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р5	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

– Захист від випадкового дотику. Усі оголені виходи силових плат, клемники підключення АКБ та PV-панелей закриваються діелектричними захисними кожухами. Вимірювання та осцилографування сигналів у високовольтних каскадах виконуються виключно за допомогою ізольованих щупів або диференційних пробників.

– Використання пристроїв захисного відключення (ПЗО) на лінії живлення робочого місця розробника зі струмом спрацьовування не більше 30 мА.

5.2.2. Забезпечення мікроклімату та вентиляції

– Для видалення токсичних парів флюсу та свинцевого пилу робоче місце для паяння та макетування обладнується місцевою витяжною вентиляцією (активні димовловлювачі з вугільними Нера-фільтрами) зі швидкістю руху повітря у зоні паяння не менше 0,5 м/с відповідно до СНіП 2.04.05-91.

– Параметри загального мікроклімату в лабораторії повинні відповідати ДСН 3.3.6.042-99: температура повітря в теплий період року 22-25°C, відносна вологість 40–60%.

5.2.3. Виробниче освітлення

Розробка та пайка плат відноситься до робіт найвищої точності (І–ІІ розряди зорових робіт).

Згідно з ДБН В.2.5-28:2018, комбіноване освітлення робочого столу (загальне + місцеве безвідблискове джерело світла) має забезпечувати освітленість не менше 750 Лк.

5.3. Пожежна безпека

Пристрій моніторингу та сам гібридний інвертор містять значну кількість компонентів, що працюють у важких теплових режимах, а також підключені до потужних джерел енергії (АКБ ємністю в сотні ампер-годин, які мають високі струми короткого замикання). Ризик виникнення пожежі класифікується за категорією В (згідно з ДСТУ Б В.1.1-36:2016).

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р5	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

5.3.1. Заходи попередження пожежі:

– Апаратний захист від КЗ: Усі кола живлення розроблюваного пристрою моніторингу захищаються плавкими запобіжниками або самовідновлюваними запобіжниками (PPTC). Лінії АКБ захищаються автоматичними вимикачами постійного струму (DC-breakers) та плавкими вставками класу gPV.

– Вибір матеріалів: Друкована плата пристрою проектується на базі склотекстоліту марки FR-4, що не підтримує горіння. Корпус пристрою виконується із негорючого ABS-пластику зі стійкістю до займання класу UL94-V0.

– Контроль температури: У програмне забезпечення пристрою моніторингу закладається алгоритм теплового захисту: при перевищенні температури силових ключів інвертора чи елементів БЖ вище за критичну (наприклад, 85°C), пристрій ініціює програмне скидання навантаження або видає сигнал аварії.

5.3.2. Засоби пожежогасіння:

– Приміщення лабораторії/серверної комплектується первинними засобами пожежогасіння. Оскільки гасіння пожежі може відбуватися в електроустановках під напругою, категорично заборонено використання пінних чи водних вогнегасників.

– Для ліквідації осередків займання застосовуються вуглекислотні вогнегасники (типу ВВ-3 або ВВ-5) або порошкові вогнегасники, призначені для гасіння пожеж класу Е (напругою до 1000 В).

5.4. Безпека в надзвичайних ситуаціях (НС)

З урахуванням сучасних умов, розробка та експлуатація систем енергопостачання та моніторингу пов'язані з ризиками техногенних аварій, спричинених руйнуванням енергетичної інфраструктури, або виникненням внутрішніх системних криз.

5.4.1. Дії при виникненні аварійної ситуації з обладнанням:

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р5	Арк.
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		54

– Негайне знеструмлення: При появі диму, іскріння, запаху горілої ізоляції або неконтрольованого зростання параметрів на моніторі, оператор зобов'язаний негайно натиснути кнопку аварійного відключення (Estop) або знеструмити стенд загальним рубильником (відключити AC-Grid, PV-input та розчепити автомат АКБ).

– Локалізація аварії: Якщо сталося займання компонентів, після повного знеструмлення застосувати вуглекислотний вогнегасник.

5.4.2. Дії при ураженні електричним струмом:

– Швидко звільнити потерпілого від дії електричного струму шляхом вимкнення апарата живлення. Якщо це неможливо — застосувати діелектричні предмети (суху дерев'яну палицю, ізольований інструмент).

– Викликати швидку медичну допомогу.

– Оцінити стан потерпілого: за відсутності пульсу та дихання негайно розпочати серцево-легеневу реанімацію (штучне дихання та непрямий масаж серця) і проводити її до приїзду медиків.

5.4.3. Організаційні заходи при оголошенні повітряної тривоги / загрози ураження:

При отриманні сигналу оповіщення про цивільну небезпеку, експериментальні стенди з інверторним обладнанням мають бути переведені в безпечний (автономний або повністю вимкнений) режим, щоб уникнути пожежі у разі фізичного пошкодження будівлі.

Персонал лабораторії повинен чітко знати маршрут евакуації та негайно пройти до найближчого сертифікованого укриття.

Висновки до розділу.

Виконаний аналіз умов праці при розробці та обслуговуванні пристрою моніторингу гібридного інвертора дозволив визначити потенційні ризики, пов'язані з високою напругою, хімічними виділеннями при паянні та пожежною небезпекою силових DC/AC каскадів. Впроваджені інженерно-технічні рішення (захисне заземлення, гальванічна розв'язка вимірювальних

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р5	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

каналів, використання негорючих матеріалів FR-4, встановлення локальної витяжної вентиляції та вуглекислотних вогнегасників) забезпечують відповідність умов праці чинним санітарним нормам та правилам техніки безпеки України, мінімізуючи ризики для життя і здоров'я персоналу.

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Р5	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було досягнуто поставленої мети та отримано наступні результати:

Аналіз існуючих рішень показав тенденцію переходу від закритих хмарних платформ до локальних гібридних систем (Edge Computing), що забезпечують вищу швидкість реакції та автономність.

Розроблено схемотехніку пристрою на базі мікроконтролера ESP32-S2. Застосування диференціального трансивера з тривірневим захистом (гальванічна ізоляція даних та живлення, TVS-бар'єр) дозволило забезпечити надійний обмін даними в умовах інтенсивних завад від силових ключів інвертора.

Реалізовано програмне забезпечення, яке за допомогою асинхронних модулів ESPHome виконує циклічне опитування інвертора Must PH1800 (Slave ID 0x04) на швидкості 19200 baud.

Впроваджено систему локальної візуалізації на OLED-дисплеї у режимі "каруселі", що дозволяє оператору контролювати стан АКБ, генерацію PV-панелей та потужність навантаження навіть за відсутності мережі Wi-Fi.

Верифікація системи на програмно-емульованому стенді підтвердила коректність роботи алгоритмів напівдуплексного обміну та точність математичної обробки даних (масштабування регістрів та розрахунків лямбда-функції).

Аналіз охорони праці підтвердив безпечність розроблених рішень за умови дотримання правил електробезпеки та використання засобів захисту в колах з напругою до 1000 В.

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Висновки	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. How Solar Monitoring Works – Portals, Apps, CT Clamps and Live... / Solar Tech Support. 2026. URL: <https://solar-tech-support.co.uk/guides/how-solar-monitoring-works/> (дата звернення: 01.06.2026).
2. How to Choose a Solar Hybrid Inverter for Your U.S. Home: 8 Key Questions / Liniotech. 2026. URL: <https://liniotech.com/blog/how-to-choose-the-best-hybrid-inverter-for-home/> (дата звернення: 01.06.2026).
3. How to Monitor a Hybrid Solar System Remotely in 2026 / Eneronix. 2026. URL: <https://eneronix.com/how-to-monitor-a-hybrid-solar-system-remotely/> (дата звернення: 01.06.2026).
4. Inverters & energy solutions / Fronius International. 2026. URL: <https://www.fronius.com/en-us/usa/solar-energy/installers-partners/products-solutions/inverters-and-energy-solutions> (дата звернення: 01.06.2026).
5. Deye Inverter Modbus Register Guide | PDF | Networking Standards / Scribd. 2026. URL: <https://www.scribd.com/document/790942448/deye-modbus-registers-pdf> (дата звернення: 01.06.2026).
6. Accessories & Monitoring / Solis. 2026. URL: <https://www.solisinverters.com/ng/accessoriesmonitoring.html> (дата звернення: 01.06.2026).
7. Is my inverter supported? / Solar Assistant. 2026. URL: <https://solar-assistant.io/help/general/is-my-inverter-supported> (дата звернення: 01.06.2026).
8. Industrial USB to RS485 Converter, Original FT232RNL and SP485EEN / WaveShare. 2026. URL: <https://www.waveshare.com/usb-to-rs485.htm> (дата звернення: 01.06.2026).
9. Waveshare Industrial USB to RS485 Bidirectional Converter / PiShop.us. 2026. URL: <https://www.pishop.us/product/industrial-usb-to-rs485-bidirectional-converter/> (дата звернення: 01.06.2026).
10. Industrial Grade Serial Server RS232/485 To WiFi and Ethernet, Modbus Gateway, MQTT Gateway, Metal Case / WaveShare. 2026. URL:

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

<https://www.waveshare.com/rs232-485-to-wifi-eth-b.htm> (дата звернення: 01.06.2026).

11. Hybrid energy management: Local gateway and cloud solutions / gridX. 2026. URL: <https://www.gridx.ai/blog/hybrid-energy-management-local-gateway-vs-cloud> (дата звернення: 01.06.2026).

12. Best Solar Monitoring App Malaysia 2026: SolisCloud vs FusionSolar vs Growatt / Trexon. 2026. URL: <https://trexon.my/blog/solar-monitoring-system-app-malaysia-2026-comparison> (дата звернення: 01.06.2026).

13. Why SolisCloud Data Looks Incorrect (Explained Simply) / Solis Service Center. 2026. URL: <https://solis-service.solisinverters.com/en/support/solutions/articles/44002686962-why-is-data-in-solisccloud-not-shown-as-expected-> (дата звернення: 01.06.2026).

14. Solar Assistant Support · evcc-io evcc · Discussion #12244 / GitHub. 2026. URL: <https://github.com/evcc-io/evcc/discussions/12244> (дата звернення: 01.06.2026).

15. Building a Smart Inverter Monitor with ESP32 and Modbus / Zbotic. 2026. URL: <https://zbotic.in/building-a-smart-inverter-monitor-with-esp32-and-modbus/> (дата звернення: 01.06.2026).

16. Venus OS Large image: Signal K and Node-RED / Victron Energy. 2026. URL: <https://www.victronenergy.com/live/venus-os:large> (дата звернення: 01.06.2026).

17. Solar-Assistant Orange PI LTS Monitoring Solar Inverters with 32GB Micro SD Card / eBay. 2026. URL: <https://www.ebay.com/itm/375653278776> (дата звернення: 01.06.2026).

18. Online Shop / SolarAssistant. 2026. URL: <https://solar-assistant.io/shop> (дата звернення: 01.06.2026).

19. Solar Assistant Licence / Power Forum. 2026. URL: <https://powerforum.co.za/topic/32934-solar-assistant-licence/> (дата звернення: 01.06.2026).

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

20. Solar Assistant perpetual license = 2 years / DIY Solar Power Forum. 2026. URL: <https://diysolarforum.com/threads/solar-assistant-perpetual-license-2-years.110536/> (дата звернення: 01.06.2026).
21. Open source / Victron Energy. 2026. URL: https://www.victronenergy.com/live/open_source:start?do=export_pdf (дата звернення: 01.06.2026).
22. Open source [Victron Energy] / Victron Energy. 2026. URL: https://www.victronenergy.com/live/open_source:start (дата звернення: 01.06.2026).
23. Solis Cloud App: 10 Hidden Features You're Not Using Yet / Solarfox®. 2026. URL: <https://www.solar-display.com/soliscloud-app-10-hidden-features-youre-not-using-yet/> (дата звернення: 01.06.2026).
24. Hybrid Inverters / sun.store. 2026. URL: <https://sun.store/en/catalog/solar-inverters/hybrid-inverters?page=9> (дата звернення: 01.06.2026).
25. johanmeijer/grott: Growatt inverter monitor · GitHub / GitHub. 2026. URL: <https://github.com/johanmeijer/grott> (дата звернення: 01.06.2026).
26. EG4 battery setup in SolarAssistant / SolarAssistant. 2026. URL: <https://solar-assistant.io/help/battery/eg4> (дата звернення: 01.06.2026).
27. Solar inverter Modbus Home Assistant Integration (RS485 + ESP32...) / Marklabs. 2026. URL: <https://marklabs.pl/en/solar-inverter-modbus-home-assistant-integration-rs485-esp32-guide/> (дата звернення: 01.06.2026).
28. Using Home Assistant (Modbus) to read the inverters (12kXP's) and EG4 LL-S (in closed loop) / DIY Solar Power Forum. 2026. URL: <https://diysolarforum.com/threads/using-home-assistant-modbus-to-read-the-inverters-12kxps-and-eg4-ll-s-in-closed-loop.125618/> (дата звернення: 01.06.2026).
29. Usage of RS485 for solar energy system (TX,RS,A,B pins) / Raspberry Pi Forums. 2026. URL: <https://forums.raspberrypi.com/viewtopic.php?t=380013> (дата звернення: 01.06.2026).

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

30. JK inverter BMS setup in SolarAssistant / SolarAssistant. 2026. URL: <https://solar-assistant.io/help/battery/jk-inverter-bms> (дата звернення: 01.06.2026).

31. Growatt SPH 10000TL-HU-US Modbus direct Home Assistant integration with ESP32 / DIY Solar Power Forum. 2026. URL: <https://diysolarforum.com/threads/growatt-sph-10000tl-hu-us-modbus-direct-home-assistant-integration-with-esp32.119076/> (дата звернення: 01.06.2026).

32. Can I use HA for local-only monitoring of my home solar / Home Assistant Community. 2026. URL: <https://community.home-assistant.io/t/can-i-use-ha-for-local-only-monitoring-of-my-home-solar/777992> (дата звернення: 01.06.2026).

33. Deye Inverter (Local) / Homey. 2026. URL: [https://homey.app/en-us/app/gpm.deye.solarpanel.tcp/Deye-Inverter-\(Local\)/](https://homey.app/en-us/app/gpm.deye.solarpanel.tcp/Deye-Inverter-(Local)/) (дата звернення: 01.06.2026).

34. Solarman V5 Protocol / pysolarmanv5 documentation. 2026. URL: https://pysolarmanv5.readthedocs.io/en/stable/solarmanv5_protocol.html (дата звернення: 01.06.2026).

35. pysolarmanv5 documentation / Read the Docs. 2026. URL: <https://pysolarmanv5.readthedocs.io/> (дата звернення: 01.06.2026).

36. grott/grott.py at master · johanmeijer/grott / GitHub. 2026. URL: <https://github.com/johanmeijer/grott/blob/master/grott.py> (дата звернення: 01.06.2026).

37. Setting up Grott Server · johanmeijer grott · Discussion #582 / GitHub. 2026. URL: <https://github.com/johanmeijer/grott/discussions/582> (дата звернення: 01.06.2026).

38. Code and Module Overview Starting Point · johanmeijer grott · Discussion #591 / GitHub. 2026. URL: <https://github.com/johanmeijer/grott/discussions/591> (дата звернення: 01.06.2026).

39. Home Assistant Grott Plugin Not Working: Server IP Resetting to Default / Home Assistant Community. 2026. URL: <https://community.home-assistant.io/t/home-assistant-grott-plugin-not-working-server-ip-resetting-to-default>

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

assistant.io/t/home-assistant-grott-plugin-not-working-server-ip-resetting-to-default/750624 (дата звернення: 01.06.2026).

40. githubDante/deye-controller: DEYE Hybrid inverters library · GitHub / GitHub. 2026. URL: <https://github.com/githubDante/deye-controller> (дата звернення: 01.06.2026).

41. Write Modbus Registers? · Issue #301 · StephanJoubert/home_assistant_solarman / GitHub. 2026. URL: https://github.com/StephanJoubert/home_assistant_solarman/issues/301 (дата звернення: 01.06.2026).

42. Can solar inverters be hacked? / Solarif. 2026. URL: <https://solarif.com/academy-article/can-solar-inverters-be-hacked/> (дата звернення: 01.06.2026).

43. Solar Inverter Cybersecurity: Protect Your PV System / Aforeenergy. 2026. URL: <https://www.aforeenergy.com/solar-inverter-cybersecurity-protect-your-pv-system/> (дата звернення: 01.06.2026).

44. Solar Cybersecurity Basics / Department of Energy. 2026. URL: <https://www.energy.gov/cmei/systems/solar-cybersecurity-basics> (дата звернення: 01.06.2026).

45. How to secure solar data loggers from cyber threats and unauthorized access / KaaIoT. 2026. URL: <https://www.kaaiot.com/iot-knowledge-base/how-to-secure-solar-data-loggers-from-cyber-threats-and-unauthorized-access> (дата звернення: 01.06.2026).

46. Can a Solar Inverter Be Hacked? / Easun Power. 2026. URL: <https://www.easunpower.com/blogs/news/solar-inverter-hacked-guide> (дата звернення: 01.06.2026).

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

Програмне забезпечення МК

```
esphome:
  name: esp32-inverter-monitor
  friendly_name: ESP32_Inverter_Monitor

esp32:
  board: esp32-s2-saola-1
  framework:
    type: arduino

substitutions:
  inverter_id: inverter
  updates: 10s
  api_key: "IVeOW54VOpV4WBEgvCYZ1VkFkzebUAxOM+Djq0dUgHM="
  ota_password: "d2e5033a55d4eaa812d0c3b92b465ca1"

wifi:
  ssid: "Wokwi-GUEST"
  password: ""
  # Enable fallback hotspot (captive portal) in case wifi connection
  fails
  ap:
    ssid: "Esp32-Inverter-Monitor"
    password: "8LrF91pTsY0R"

logger:
  level: INFO
  hardware_uart: UART0
  baud_rate: 115200

api:
  encryption:
    key: ${api_key}

ota:
  - platform: esphome
    password: ${ota_password}

captive_portal:
# Thanks to @LionBS76 https://github.com/LionBS76
#
https://gist.github.com/vladyspavlov/5ac21cb58923482eff8e7bbb2d0854b
3?permalink_comment_id=5225653#gistcomment-5225653

uart:
  - id: uart_inverter
    baud_rate: 19200
    tx_pin: GPIO017
    rx_pin: GPIO018
    stop_bits: 1
    parity: NONE
    data_bits: 8
```

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ документи	Підпис	Дата		


```

debug:
  direction: BOTH
  dummy_receiver: false

modbus:
  - id: modbus_inverter
    uart_id: uart_inverter
    send_wait_time: 500ms
    #flow_control_pin: GPIO0

modbus_controller:
  - id: must_inverter
    address: 0x04
    modbus_id: modbus_inverter
    command_throttle: 300ms
    setup_priority: -10
    update_interval: ${updates}

sensor:
  # charger sensors
  - platform: modbus_controller
    modbus_controller_id: must_inverter
    address: 15201
    name: "PV Charger Workstate"
    register_type: holding

  - platform: modbus_controller
    modbus_controller_id: must_inverter
    address: 15202
    name: "PV Charger MPPT state"
    register_type: holding

  - platform: modbus_controller
    modbus_controller_id: must_inverter
    address: 15203
    name: "PV Charger Charging state"
    register_type: holding

  - platform: modbus_controller
    modbus_controller_id: must_inverter
    address: 15205
    name: "PV Charger Voltage"
    id: pv_charger_voltage
    register_type: holding
    unit_of_measurement: "V"
    accuracy_decimals: 1
    icon: mdi:sine-wave
    filters:
      multiply: 0.1

  - platform: modbus_controller
    modbus_controller_id: must_inverter
    address: 15206
    name: "PV Charger Battery voltage"
    id: pv_charger_battery_voltage
    register_type: holding
    unit_of_measurement: "V"
    accuracy_decimals: 1
    icon: mdi:sine-wave
    filters:
      multiply: 0.1

```

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

```

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 15207
  name: "PV Charger Current"
  register_type: holding
  unit_of_measurement: "A"
  accuracy_decimals: 1
  icon: mdi:current-dc
  filters:
    multiply: 0.1

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 15208
  register_type: holding
  name: "PV Charger power"
  id: pv_charger_power
  unit_of_measurement: "W"
  accuracy_decimals: 1
  icon: mdi:flash

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 15209
  register_type: holding
  name: "PV Charger Radiator temp"
  unit_of_measurement: "°C"
  accuracy_decimals: 1
  icon: mdi:temperature-celsius

# - platform: modbus_controller
#   modbus_controller_id: must_inverter
#   address: 15210
#   register_type: holding
#   name: "PV Charger External temp"
#   unit_of_measurement: "°C"
#   accuracy_decimals: 1
#   icon: mdi:temperature-celsius

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 15212
  register_type: holding
  name: "PV Relay"
  icon: mdi:electric-switch

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 15217
  register_type: holding
  id: charger_total_mwh
  internal: true

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 15218
  register_type: holding
  id: charger_total_kwh
  internal: true
  filters:
    multiply: 0.1

- platform: template

```

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ документи	Підпис	Дата		

```

    name: "PV Charger Accumulated charger power"
    device_class: energy
    state_class: total
    unit_of_measurement: kWh
    lambda: !lambda 'return (id(charger_total_mwh).state * 1000.0 +
id(charger_total_kwh).state );'
    accuracy_decimals: 1

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 15219
  register_type: holding
  name: "PV Charger Accumulated day"
  id: pv_charger_accumulated_day
  unit_of_measurement: "W"
  accuracy_decimals: 1
  icon: mdi:flash

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 15220
  register_type: holding
  name: "PV Charger Accumulated hour"
  unit_of_measurement: "W"
  accuracy_decimals: 1
  icon: mdi:flash

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 15221
  register_type: holding
  name: "PV Charger Accumulated minute"
  unit_of_measurement: "W"
  accuracy_decimals: 1
  icon: mdi:flash

# inverter sensors
- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25201
  register_type: holding
  name: "Inverter Work state"
  id: inverter_work_state
  # 0:PowerOn
  # 1:SelfTest
  # 2:OffGrid
  # 3:Grid-Tie
  # 4:ByPass
  # 5:Stop
  # 6:Grid charging
  #

https://gist.github.com/vladyspavlov/5ac21cb58923482eff8e7bbb2d0854b3?permalink\_comment\_id=5301160#gistcomment-5301160

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25205
  name: "Inverter Battery Voltage"
  register_type: holding
  unit_of_measurement: "V"
  accuracy_decimals: 1
  icon: mdi:sine-wave
  filters:

```

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ документи	Підпис	Дата		

```

        multiply: 0.1

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25206
  name: "Inverter Voltage"
  register_type: holding
  unit_of_measurement: "V"
  accuracy_decimals: 1
  icon: mdi:sine-wave
  filters:
    multiply: 0.1

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25207
  name: "Inverter Grid voltage"
  id: inverter_grid_voltage
  register_type: holding
  unit_of_measurement: "V"
  accuracy_decimals: 1
  icon: mdi:sine-wave
  filters:
    multiply: 0.1

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25208
  name: "Inverter BUS Voltage"
  register_type: holding
  unit_of_measurement: "V"
  accuracy_decimals: 1
  icon: mdi:sine-wave
  filters:
    multiply: 0.1

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25209
  name: "Inverter Control current"
  register_type: holding
  unit_of_measurement: "A"
  accuracy_decimals: 1
  icon: mdi:current-dc
  filters:
    multiply: 0.1

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25210
  name: "Inverter Current"
  register_type: holding
  unit_of_measurement: "A"
  accuracy_decimals: 1
  icon: mdi:current-dc
  filters:
    multiply: 0.1

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25211
  name: "Inverter Grid current"
  register_type: holding

```

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ документи	Підпис	Дата		

```

    unit_of_measurement: "A"
    accuracy_decimals: 1
    icon: mdi:current-ac
    filters:
        multiply: 0.1

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25212
  name: "Inverter Load current"
  register_type: holding
  unit_of_measurement: "A"
  accuracy_decimals: 1
  icon: mdi:current-ac
  filters:
    multiply: 0.1

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  value_type: S_WORD
  address: 25213
  name: "Inverter Power"
  register_type: holding
  unit_of_measurement: "W"
  accuracy_decimals: 1
  icon: mdi:flash

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25214
  name: "Inverter Grid power"
  register_type: holding
  unit_of_measurement: "W"
  accuracy_decimals: 1
  value_type: S_WORD
  icon: mdi:flash

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25215
  name: "Inverter Load power"
  id: inverter_load_power
  register_type: holding
  unit_of_measurement: "W"
  accuracy_decimals: 1
  icon: mdi:flash

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25216
  name: "Inverter System load"
  id: inverter_system_load
  register_type: holding
  unit_of_measurement: "%"
  accuracy_decimals: 1
  icon: mdi:flash

- platform: modbus_controller
  address: 25226
  name: "Grid frequency"
  register_type: holding
  accuracy_decimals: 2
  unit_of_measurement: "Hz"

```

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ документи	Підпис	Дата		

```

filters:
    multiply: 0.01

# MOST INFO

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25233
  register_type: holding
  name: "Inverter AC radiator temp"
  id: inverter_ac_radiator_temp
  accuracy_decimals: 1
  unit_of_measurement: "°C"
  icon: mdi:temperature-celsius

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25234
  register_type: holding
  name: "Inverter Transformer temp"
  unit_of_measurement: "°C"
  accuracy_decimals: 1
  icon: mdi:temperature-celsius

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25235
  register_type: holding
  name: "Inverter DC Radiator temp"
  unit_of_measurement: "°C"
  accuracy_decimals: 1
  icon: mdi:temperature-celsius

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25237
  register_type: holding
  name: "Inverter Relay state"
  icon: mdi:electric-switch

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25238
  register_type: holding
  name: "Inverter Relay state Grid"
  icon: mdi:electric-switch

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25239
  register_type: holding
  name: "Inverter Relay state Load"
  icon: mdi:electric-switch

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25240
  register_type: holding
  name: "Inverter Relay state NLine"
  icon: mdi:electric-switch

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter

```

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

```

    address: 25241
    register_type: holding
    name: "Inverter Relay state DC"
    icon: mdi:electric-switch

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25242
  register_type: holding
  name: "Inverter Relay state Earth"
  icon: mdi:electric-switch

# Inverter Accumulated discharge power
- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25247
  register_type: holding
  id: discharger_total_mwh
  internal: true

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25248
  register_type: holding
  id: discharger_total_kwh
  internal: true
  filters:
    multiply: 0.1

- platform: template
  name: "Accumulated discharger power"
  unit_of_measurement: kWh
  accuracy_decimals: 1
  lambda: !lambda 'return (id(discharger_total_mwh).state * 1000.0
+ id(discharger_total_kwh).state);'

# Inverter Accumulated buy power
- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25249
  register_type: holding
  id: buy_mwh
  internal: true

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25250
  register_type: holding
  id: buy_kwh
  internal: true
  filters:
    multiply: 0.1

- platform: template
  name: "Accumulated buy power"
  device_class: energy
  state_class: total
  unit_of_measurement: kWh
  lambda: |-
    return (id(buy_mwh).state * 1000.0 + id(buy_kwh).state);
  accuracy_decimals: 1

# Inverter Accumulated sell power

```

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ документи	Підпис	Дата		

```

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25251
  register_type: holding
  id: sell_mwh

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25252
  register_type: holding
  id: sell_kwh
  filters:
    multiply: 0.1

- platform: template
  name: "Accumulated sell power"
  device_class: energy
  state_class: total
  unit_of_measurement: kWh
  accuracy_decimals: 1
  lambda: !lambda return (id(sell_mwh).state * 1000.0 +
id(sell_kwh).state);

# Inverter Accumulated load power
- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25253
  register_type: holding
  id: load_mwh
  internal: True

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25254
  register_type: holding
  id: load_kwh
  internal: True
  filters:
    multiply: 0.1

- platform: template
  name: "Accumulated load power"
  device_class: energy
  state_class: total
  unit_of_measurement: kWh
  accuracy_decimals: 1
  lambda: !lambda return (id(load_mwh).state * 1000.0 +
id(load_kwh).state);

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25273
  register_type: holding
  value_type: S_WORD
  name: "Inverter Battery power"
  unit_of_measurement: "W"
  accuracy_decimals: 1
  icon: mdi:flash

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25274
  register_type: holding

```

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		


```

value_type: S_WORD
name: "Inverter Battery current"
id: inverter_battery_current
unit_of_measurement: "A"
accuracy_decimals: 1
icon: mdi:current-dc

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25275
  register_type: holding
  value_type: S_WORD
  name: "Inverter Battery grade"
  unit_of_measurement: "V"
  icon: mdi:alpha-V

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 25277
  register_type: holding
  name: "Inverter Rated power"
  unit_of_measurement: "W"
  accuracy_decimals: 1
  icon: mdi:flash

select:
- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  id: energy_use_mode
  name: "Inverter Energy use mode (parameter 00)"
  address: 20109
  optionsmap:
    "SBU (Solar/battery/utility)": 1
    "SUB (Solar/utility/battery)": 2
    "UTI (Utility only)": 3
    "SOL (Solar only)": 4

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  id: charger_source_priority
  name: "Inverter Charger source priority (parameter 10)"
  address: 20143
  optionsmap:
    "CSO (Solar first)": 0
    "SNU (Solar and utility)": 2
    "OSO (Solar only)": 3

- platform: modbus_controller
  modbus_controller_id: must_inverter
  address: 20111
  id: inverter_ac_input_voltage_range
  name: "Inverter AC input voltage range (02)"
  optionsmap:
    "VDE (184-253VAC)": 0
    "UPS (170-280VAC)": 1
    "APL (90-280VAC)": 2
    "GEN (Generator)": 3

number:
- platform: modbus_controller
  id: batt_float_voltage
  name: "PV Charger Float voltage"
  unit_of_measurement: "V"

```

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ документи	Підпис	Дата		

```

address: 10103
value_type: U_WORD
multiply: 10

- platform: modbus_controller
  id: batt_absorb_voltage
  name: "PV Charger Absorb voltage"
  unit_of_measurement: "V"
  address: 10104
  value_type: U_WORD
  multiply: 10

- platform: modbus_controller
  id: batt_stop_dischg
  name: "Inverter Battery stop discharging voltage"
  unit_of_measurement: "V"
  address: 20118
  value_type: U_WORD
  lambda: "return x * 0.1; "
  write_lambda: |-
    return x * 10 ;

- platform: modbus_controller
  id: batt_stop_chg
  name: "Inverter Battery stop charging voltage"
  unit_of_measurement: "V"
  address: 20119
  value_type: U_WORD
  multiply: 10

- platform: modbus_controller
  id: batt_low_voltage
  name: "Inverter Battery low voltage"
  unit_of_measurement: "V"
  address: 20127
  value_type: U_WORD
  multiply: 10

- platform: modbus_controller
  id: batt_high_voltage
  name: "Inverter Battery high voltage"
  unit_of_measurement: "V"
  address: 20128
  value_type: U_WORD
  multiply: 10

- platform: modbus_controller
  id: solar_charger_current
  name: "Inverter Charger current"
  unit_of_measurement: "A"
  address: 20132
  value_type: U_WORD
  multiply: 10

i2c:
  sda: GPIO8
  scl: GPIO9
  scan: true
  id: bus_a

# 2. Завантаження шрифту (використовуємо безкоштовний Roboto або
системний у Wokwi)
font:

```

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

```

- file: "gfonts://Roboto"
  id: font_small
  size: 9
- file: "gfonts://Roboto"
  id: font_medium
  size: 14
- file: "gfonts://Roboto"
  id: font_large
  size: 20

- file: "https://github.com/Templarian/MaterialDesign-Webfont/raw/master/fonts/materialdesignicons-webfont.ttf"
  id: font_icon
  size: 16
  glyphs:
    - "\U000F0254" # flash (блискавка)
    - "\U000F008A" # battery (АКБ)
    - "\U000F0A18" # solar-power (панелі)

# 4. Конфігурація дисплея SSD1306 з каруселлю сторінок
display:
- platform: ssd1306_i2c
  model: "SSD1306 128x64"
  address: 0x3C
  id: oled_display
  pages:
    # --- СТОРІНКА 1: Загальний статус та АКБ ---
    - id: page1
      lambda: |-
        // Заголовок статусу
        it.printf(0, 0, id(font_small), "Must PH1800 Status");
        it.line(0, 11, 128, 11);

        // Іконка та напруга батареї
        it.print(0, 16, id(font_icon), "\U000F008A"); // Іконка
        батареї
        if (id(pv_charger_battery_voltage).has_state()) {
          it.printf(20, 14, id(font_medium), "%.1f V",
            id(pv_charger_battery_voltage).state);
        } else {
          it.print(20, 14, id(font_medium), "--- V");
        }

        // Струм заряду/розряду
        if (id(inverter_battery_current).has_state()) {
          it.printf(20, 30, id(font_small), "Current: %.1f A",
            id(inverter_battery_current).state);
        }

        // Поточний режим роботи інвертора (текстовий статус
        нижче)
        it.line(0, 50, 128, 50);
        if (id(inverter_work_state).has_state()) {
          int state = (int)id(inverter_work_state).state;
          const char* state_str = "Unknown";
          switch(state) {
            case 0: state_str = "Power On"; break;
            case 1: state_str = "Self Test"; break;
            case 2: state_str = "Off Grid"; break;
            case 3: state_str = "Grid-Tie"; break;
            case 4: state_str = "ByPass"; break;
            case 5: state_str = "Stop"; break;

```

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

```

        case 6: state_str = "Grid Charging"; break;
    }
    it.printf(0, 53, id(font_small), "Mode: %s", state_str);
}

# --- СТОРІНКА 2: Сонячні панелі та Генерація ---
- id: page2
  lambda: |-
    it.printf(0, 0, id(font_small), "PV Charger & Power");
    it.line(0, 11, 128, 11);

    // Потужність PV
    it.print(0, 16, id(font_icon), "\U000F0A18"); // Іконка
сонця
    if (id(pv_charger_power).has_state()) {
        it.printf(20, 14, id(font_medium), "%.0f W",
id(pv_charger_power).state);
    } else {
        it.print(20, 14, id(font_medium), "0 W");
    }

    // Напруга панелей
    if (id(pv_charger_voltage).has_state()) {
        it.printf(20, 32, id(font_small), "PV Volt: %.1f V",
id(pv_charger_voltage).state);
    }

    // Денна генерація
    if (id(pv_charger_accumulated_day).has_state()) {
        it.printf(0, 50, id(font_small), "Today: %.1f kWh",
id(pv_charger_accumulated_day).state / 1000.0);
    }

# --- СТОРІНКА 3: Навантаження мережі (Load & Grid) ---
- id: page3
  lambda: |-
    it.printf(0, 0, id(font_small), "Inverter Load");
    it.line(0, 11, 128, 11);

    // Потужність споживання інвертора
    it.print(0, 16, id(font_icon), "\U000F0254"); // Іконка
блискавки
    if (id(inverter_load_power).has_state()) {
        it.printf(20, 14, id(font_large), "%.0f W",
id(inverter_load_power).state);
    }

    // Навантаження у відсотках та напруга мережі
    if (id(inverter_system_load).has_state() &&
id(inverter_grid_voltage).has_state()) {
        it.printf(0, 42, id(font_small), "Load: %.0f%%",
id(inverter_system_load).state);
        it.printf(70, 42, id(font_small), "Grid: %.0fV",
id(inverter_grid_voltage).state);
    }

    if (id(inverter_ac_radiator_temp).has_state()) {
        it.printf(0, 54, id(font_small), "Temp AC: %.1f°C",
id(inverter_ac_radiator_temp).state);
    }

# 5. Таймер для автоматичного перемикання сторінок кожні 5 секунд
interval:

```

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

```
- interval: 5s
  then:
    - display.page.show_next: oled_display
```

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ документи	Підпис	Дата		

ДОДАТОК Б

Файл diagram.json Wokwi

```
{
  "version": 1,
  "author": "Палькевич_О_В",
  "editor": "wokwi",
  "parts": [
    {
      "type": "board-esp32-s2-devkitm-1",
      "id": "esp",
      "top": -61.91,
      "left": 42.97,
      "attrs": { "builder": "esp-idf" }
    },
    {
      "type": "wokwi-serial-port",
      "id": "ext-serial",
      "top": 0,
      "left": 0,
      "attrs": { "baud": "19200" }
    },
    {
      "type": "board-ssd1306",
      "id": "oled",
      "top": 185.54,
      "left": -86.17,
      "attrs": { "i2cAddress": "0x3c" }
    }
  ],
  "connections": [
    [ "esp:GND.1", "oled:GND", "black", [] ],
    [ "esp:3V3", "oled:VCC", "red", [] ],
    [ "esp:8", "oled:SDA", "blue", [] ],
    [ "esp:9", "oled:SCL", "yellow", [] ],
    [ "esp:18", "ext-serial:TX", "", [] ],
    [ "esp:17", "ext-serial:RX", "", [] ],
    [ "esp:RX", "$serialMonitor:TX", "", [] ],
    [ "esp:TX", "$serialMonitor:RX", "", [] ]
  ],
  "dependencies": {}
}
```

					171.4327ст3.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		