

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗИНА  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ  
Кафедра інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах

## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи  
за освітньо-кваліфікаційним рівнем магістр

«Розробка системи керування енергоспоживанням житлового будинку»

Виконав: студент 2 курсу, групи  
НФ-63

Содін Є. С.

спеціальність:

105 Прикладна фізика та  
наноматеріали

освітня програма: Прикладна  
фізика енергетичних систем

Керівник:

Протектор Д. О., доктор філософії

Рецензент:



- 5) Зібрати дані споживання електроенергії та розрахувати генерацію сонячних панелей;
- 6) Розробити і реалізувати алгоритми керування системою енергоспоживання в “розумному будинку”;
- 7) Провести тестування розробленої системи керування енергоспоживання.

#### 4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вибір теми.
2	Затвердження теми на кафедрі
3	Робота над літературою та іншими джерелами
4	Написання вступу до роботи та першого розділу
5	Написання другого розділу
6	Написання третього розділу
7	Написання четвертого розділу
8	Завершення написання дипломної роботи (висновки та література)
9	Подача науковому керівнику
10	Обговорення відгуку та, рецензії. Підготовка до захисту
11	Попередній захист
12	Захист

5. Дата видачі завдання «27» вересня 2024 р.

Студент

\_\_\_\_\_

підпис

Євген СОДІН

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

підпис

Денис ПРОТЕКТОР

## РЕФЕРАТ

Содін Євген “Розробка системи керування енергоспоживанням житлового будинку”, кваліфікаційна робота магістра з прикладної фізики. – Х.: Харківській національний університет імені В. Н.Каразіна, 2024. – 65 с.

У роботі проведено дослідження, спрямоване на розробку програмно-апаратного комплексу для оптимізації споживання електроенергії в житловому будинку. Основна мета полягає у забезпеченні енергонезалежності під час відключень електропостачання та зниженні споживання електроенергії у години пікових навантажень.

Реалізовано такі етапи:

1. Проведено аналіз даних енергоспоживання, генерації сонячних панелей та параметрів акумуляторних батарей.
2. Розраховано можливу генерацію сонячної енергії залежно від умов інсоляції, географічного розташування та погодних умов.
3. Розроблено алгоритми автоматичного керування режимами споживання енергії, включаючи оптимізацію заряджання та розряджання акумуляторів, а також адаптацію системи до змінних умов, як-от погодні фактори та графіки віялових відключень.
4. Створено сценарії автоматизації за допомогою Home Assistant, включаючи прогнозування генерації та контроль споживання.

Результати підтверджують ефективність запропонованої системи у зниженні залежності від зовнішньої електромережі, оптимізації енергоспоживання та підвищенні стабільності енергозабезпечення житлового будинку.

Ключові слова: енергоспоживання, енергоефективність, гібридний інвертор, сонячні панелі, акумуляторні батареї, система автоматизації, розумний будинок, Home Assistant, прогнозування, оптимізація.

## ABSTRACT

Yevhen Sodin “Development of an Energy Consumption Management System for Residential Buildings”, Master's thesis in applied physics. - Kh.: Kharkiv National University named after V. N. Karazin, 2024. - 65 p.

This study focuses on the development of a hardware-software complex aimed at optimizing electricity consumption in residential buildings. The main goal is to ensure energy independence during power outages and reduce peak load consumption.

Key accomplishments include:

1. Analysis of energy consumption data, solar panel generation, and battery parameters.
2. Calculation of potential solar energy generation based on insolation conditions, geographical location, and weather factors.
3. Development of algorithms for automatic management of energy consumption modes, including optimization of battery charging and discharging and adaptation to variable conditions such as weather forecasts and scheduled power outages.
4. Creation of automation scenarios using Home Assistant, enabling energy generation forecasting and consumption control.

The results demonstrate the system's effectiveness in reducing dependency on external power grids, optimizing energy usage, and enhancing energy supply stability for residential buildings.

Keywords: Energy consumption, energy efficiency, hybrid inverter, solar panels, battery storage, automation system, smart home, Home Assistant, forecasting, optimization.

## ЗМІСТ

Вступ	7
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ	9
1.1 Гібридний інвертор	9
1.2 Акумуляторні батареї	10
1.3 Система керування акумуляторами (BMS)	10
1.4 Моніторинг і керування	11
РОЗДІЛ 2. ПРОГРАМНО-АПАРАТНА ЧАСТИНА	18
2.1 Збір даних з інверторів і батарей	18
2.2 Моніторинг даних батарей	28
2.3 Використання даних моніторингу і елементів керування	34
2.4 Використання доповнень Home Assistant для інтеграції сторонніх сервісів	36
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ДАНИХ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СПОЖИВАННЯ І ГЕНЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ	39
3.1 Визначення реальної ємності батарей з урахуванням ККД перетворення енергії	39
3.2 Аналіз споживання енергії за сезонами	41
3.3 Аналіз споживання енергії за днями тижня	43
3.4 Розрахунок можливої генерації сонячних панелей	46
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ В ЖИТЛОВОМУ БУДИНКУ	53
4.1 Оптимізація заряджання акумуляторів з урахуванням генерації	53
4.2 Керування навантаженням	58
4.3 Додаткова підзарядка акумулятора у разі потреби	60
4.4 Повідомлення про “небажані” події	60
Висновки	62
Список використаних джерел	64

## ВСТУП

Терористичні обстріли Україні спричинили значні пошкодження генеруючих і розподільчих потужностей. Внаслідок цього виникає дефіцит електроенергії під час пікових годин і її надлишок у нічні години. Заради стабільності енергетичної системи іноді доводиться застосовувати віялові відключення електрики. Дуже важливо для конкретних домогосподарств – не залишатися без електрики під час відключень, а для енергосистеми – перенести основне споживання на нічний час, коли є надлишок електрики.

Розробка апаратно-програмного комплексу дозволить підвищити енергонезалежність квартири в житловому будинку. Використовуючи гібридний інвертор, акумулятор та (опціонально) сонячні панелі, розподілити споживання електроенергії таким чином, щоб:

- Максимально споживати електроенергію з сонячних панелей, якщо вони встановлені;
- Мінімізувати споживання електроенергії з мережі у години пікових навантажень (з 8:00 до 11:00 та з 17:00 до 23:00);
- У разі відсутності або недостатньої потужності сонячних панелей, максимально використовувати електроенергію в нічний час, коли в мережі є надлишок генерації;
- У випадку віялових відключень електроенергії максимально забезпечити живлення від акумулятора.

Для оптимізації споживання електрикою використовуватимуться:

Аналіз масивів даних з різних джерел:

- Динаміки заряду та розряду акумуляторів;
- Виробництва електроенергії сонячними панелями;
- Споживання електроенергії.

Врахування додаткових даних для прогнозування зміни споживання:

- Обчислення можливого виробництва електроенергії з урахуванням конфігурації панелей, прогнозу погоди та пори року;
- Використання наявної інформації про можливі віялові відключення;
- Аналіз змін споживання електроенергії протягом місяця і тижня.

Коригування параметрів споживання та використання електроенергії для максимально ефективного енергоспоживання.

## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ

На Рис. 1.1. представлена типова схема керування енергоспоживанням в житловому будинку.

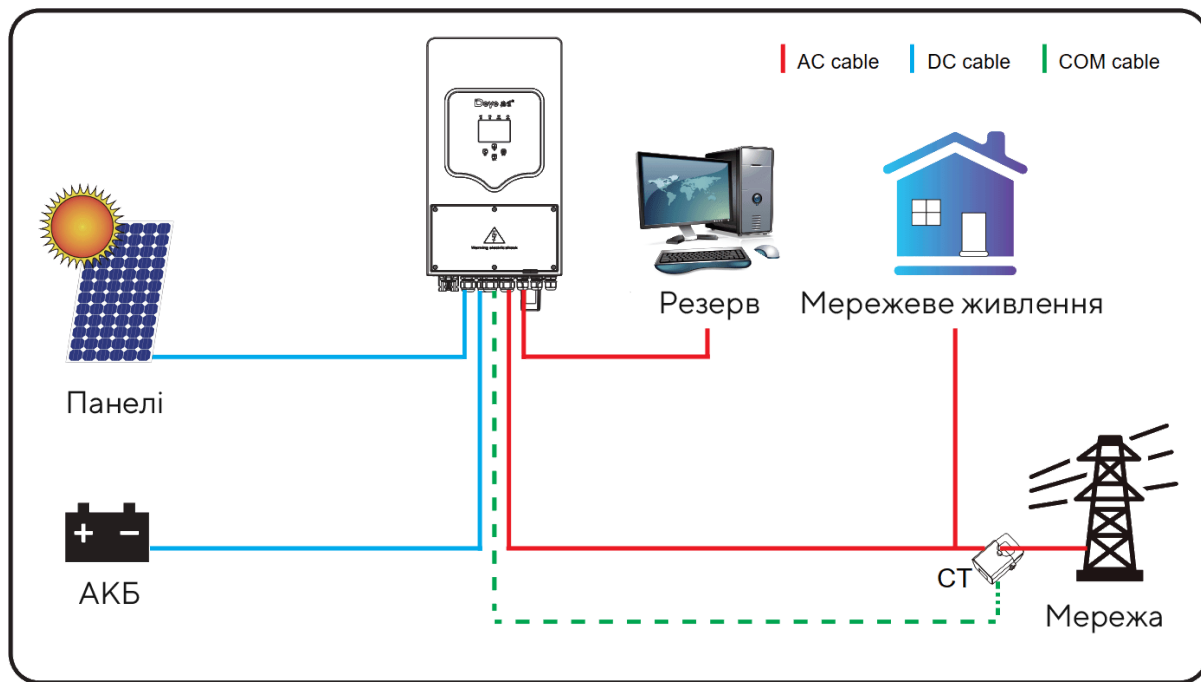


Рис. 1.1 Схема системи керування енергоспоживанням

### 1.1 Гібридний інвертор.

Це пристрій, який об'єднує в собі кілька функцій:

- **Інвертор** — перетворює постійний струм акумуляторів на змінний для живлення побутових приладів.
- **Зарядний пристрій** — перетворює змінний струм з мережі на постійний для зарядження акумуляторів, з можливістю підлаштування до характеристик акумулятора.
- **MPPT-контролер** — оптимізує використання сонячної енергії для зарядження акумуляторів та/або живлення підключених побутових приладів.

- **Автоматика** — забезпечує злагоджену роботу всіх цих пристроїв: перемикання живлення з мережі на акумулятор у випадку зникнення напруги або за вимогою, зарядку акумулятора, використання енергії з сонячних панелей та інше.

Гібридний інвертор може комбінувати використання енергії з мережі, від сонця і від акумулятора. Наприклад, якщо енергії від сонячних панелей недостатньо для живлення навантаження, то гібридний інвертор може “домішати” недостаючу енергію з мережі або акумулятора. І навпаки, якщо сонячні панелі виробляють більше енергії, ніж споживає навантаження, “зайва” енергія може бути використана для заряджання акумулятора, або, у випадку підключення “зеленого” тарифу, для продажу в мережу.

## 1.2 Акумуляторні батареї

Для квартир звичайно використовують літійзалізофосфатні акумулятори – вони можуть заряджатися і розряджатися високим струмом, при цьому досить стабільні. Звичайно використовуються збірки включених послідовно комірок з робочою напругою 3.2-3.3 вольта, які керуються BMS.

## 1.3 Система керування акумуляторами (BMS)

Battery Management System, система керування і балансування акумуляторних збірок. Вона виконує наступні функції:

1. **Моніторинг параметрів:** Відстежує напругу і струм кожної акумуляторної комірки, щоб забезпечити їх роботу в допустимих межах.
2. **Балансування елементів:** Забезпечує рівномірний заряд та розряд акумуляторних елементів, фактично стежить щоб напруга на всіх комірках була однаковою.

### 3. Захист від аномальних умов:

- a. **Перезарядка:** Запобігає перевищенню максимально допустимої напруги як кожної комірки так і збірки в цілому.
  - b. **Перерозрядка:** Запобігає зниженню напруги нижче безпечного рівня як кожної комірки так і збірки в цілому.
  - c. **Перевантаження по струму:** Захищає від надмірних струмів при зарядці або розрядці.
  - d. **Перегрівання, переохолодження:** Відключає систему при перевищенні критичних температур.
4. **Комунікація:** Передає інформацію про стан батареї до зовнішніх пристроїв або систем, дозволяючи здійснювати діагностику та керування.
  5. **Безпека:** Запобігає виникненню небезпечних ситуацій, таких як коротке замикання або термічний розгін.
  6. **Налаштування:** більшість BMS дозволяють змінити параметри захисту і балансування.

#### 1.4 Моніторинг і керування.

У багатьох інверторів і акумуляторів є **власні моніторингові пристрої** для підключення до wi-fi/bluetooth і віддаленого моніторингу і керування. Другою опцією для моніторингу і керування є рішення на **ESP32**, які існують для більшості наявних інверторів і BMS і можуть використовуватися як напряму, так і підключатися до розумного будинку під керуванням **Home Assistant** [3]. Ще одна альтернатива - це проект **Solar Assistant**, який встановлюється на **Raspberry Pi** і також підключається до більшості інверторів і BMS. Він теж підключається до **Home Assistant**, а також і сам здійснює моніторинг і керування і зберігає дані моніторингу.

### 1.4.1 Власні моніторингові пристрої

До інверторів звичайно надається (або можна докупити окремо) моніторинговий пристрій, який підключається до порту RS-232, дозволяє підключити інвертор до WI-FI і здійснювати віддалений моніторинг і керування (Рис. 1.2).



Рис. 1.2 Wi-Fi пристрій моніторингу інвертору

Звичайно для керування необхідно встановити на телефон відповідний додаток, зареєструвати в ньому модуль, і після цього можна

здійснювати керування. Деякі з таких модулів дозволяють підключати інвертор і до системи розумного будинку типу Home Assistant.

BMS звичайно надають, залежно від моделі BMS, bluetooth доступ або доступ через порти CAN/RS-232/RS-485. Для керування BMS треба встановити на комп'ютер відповідну програму (Рис. 1.3), під'єднати його дротом, наприклад, USB-RS-232, до відповідного порта і здійснити моніторинг або керування.

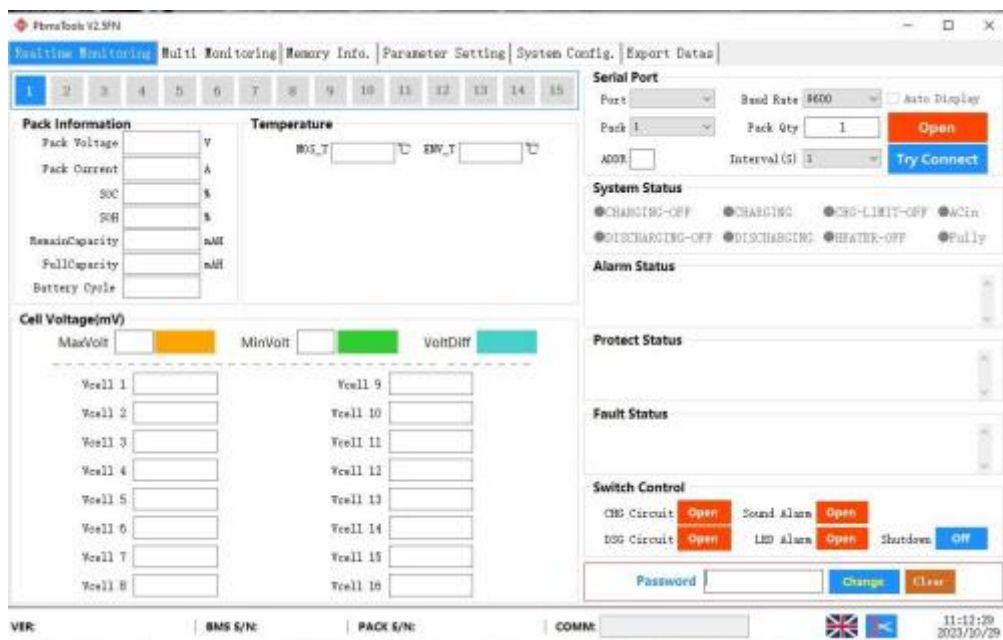


Рис. 1.3 Програма керування PACE BMS

### 1.4.2 ESP32

ESP32 (Рис. 1.4) — це серія мікроконтролерів, розроблених компанією Espressif Systems. Вони оснащені двоядерним процесором Xtensa LX6 і підтримують Wi-Fi та Bluetooth, включаючи Bluetooth Low Energy (BLE).



Рис 1.4 Плата ESP32

Основні характеристики ESP32:

- **Процесор:** Два ядра Xtensa LX6 з тактовою частотою до 240 МГц.
- **Пам'ять:** Вбудована SRAM і підтримка зовнішньої флеш-пам'яті.
- **Підключення:** Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.2 і BLE.
- **Інтерфейси:** Підтримка SPI, I2C, UART, ADC, DAC, PWM та інших периферійних інтерфейсів.
- **Низьке енергоспоживання:** Режими сну для енергоефективності в автономних пристроях.

Після встановлення відповідного програмного забезпечення, ESP32 підключається до порту RS232 або RS485 інвертора або батареї через перетворювач UART TTL.

### 1.4.3 TTL (Transistor-Transistor Logic)

Це стандарт логічних рівнів. Оскільки ESP32 використовує рівні 0 В і 3.3 В (або 5 В) для логічного "0" і "1", а наприклад в RS232 використовується напруга від -15В до +15В, то для запобігання пошкодження мікроконтролера потрібен перетворювач напруги, який

звичайно зветься “перетворювач інтерфейсу RS-485 – UART TTL” або “перетворювач інтерфейсу RS-232 – UART TTL” (Рис. 1.5).



Рис. 1.5 Перетворювач інтерфейсу RS-232 – UART TTL

Схема підключення може виглядати так, як показано на Рис. 1.6:

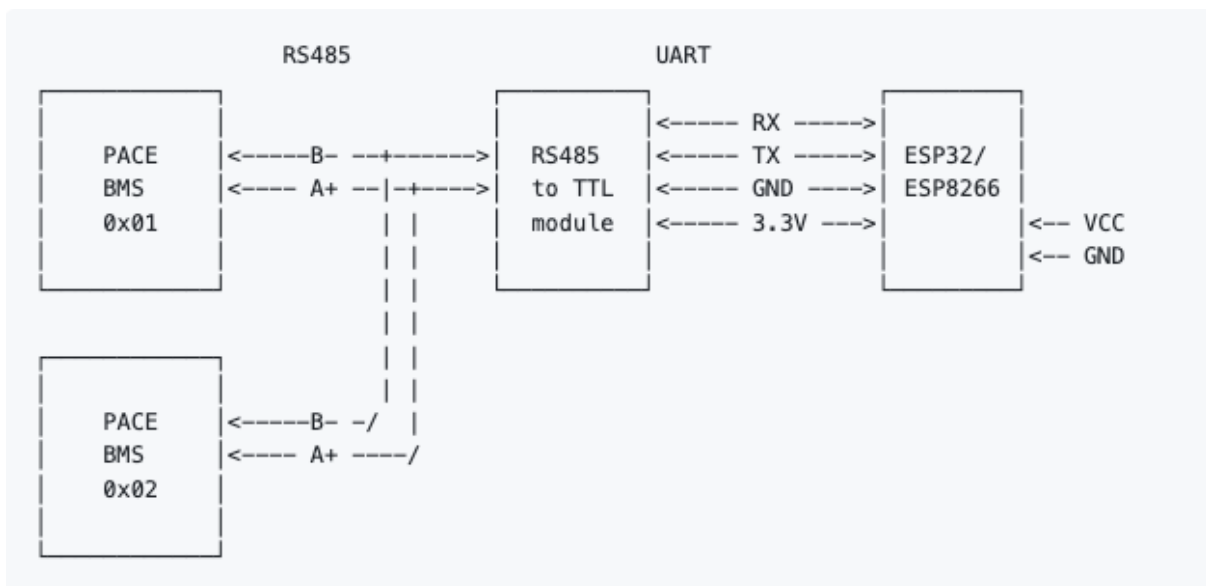


Рис 1.6 Схема підключення ESP32 до декількох батарей

На схемі дані від двох батарей з PACE BMS поступають на RS-485 – UART TTL, з якого йдуть далі на ESP32. Також RS-485 – UART TTL отримує живлення від ESP32.

### 1.4.4 Solar Assistant.

Solar Assistant [4] (Рис. 1.7) — платний проект для систем моніторингу акумуляторів, інверторів та інших компонентів сонячних енергетичних систем. Він встановлюється на одноплатний комп'ютер Raspberry Pi або Orange Pi. Для користування необхідно придбати сам проект, одноплатний комп'ютер та кабелі для з'єднання комп'ютера з інвертором і батареєю. Один комп'ютер може бути з'єднаний з декількома пристроями одночасно, наприклад, з інвертором, батареєю та іншими сенсорами.

Solar Assistant надає користувачам можливість відстежувати в реальному часі стан системи, отримувати детальну статистику, переглядати графіки продуктивності, а також отримувати сповіщення про можливі проблеми чи помилки. Підтримуються різні моделі інверторів та акумуляторів.

До вартості проекту також входить надання веб-доступу до системи, що дозволяє спостерігати та керувати пристроями з будь-якого місця з доступом до Інтернету.



Рис. 1.7 Інтерфейс Solar Assistant

**1.4.5. Solarman [2]** (Рис. 1.8) – популярний проект для моніторингу і керування інверторами. Досить зручний, але залежить від хмарного сервісу, що є суттєвим недоліком.

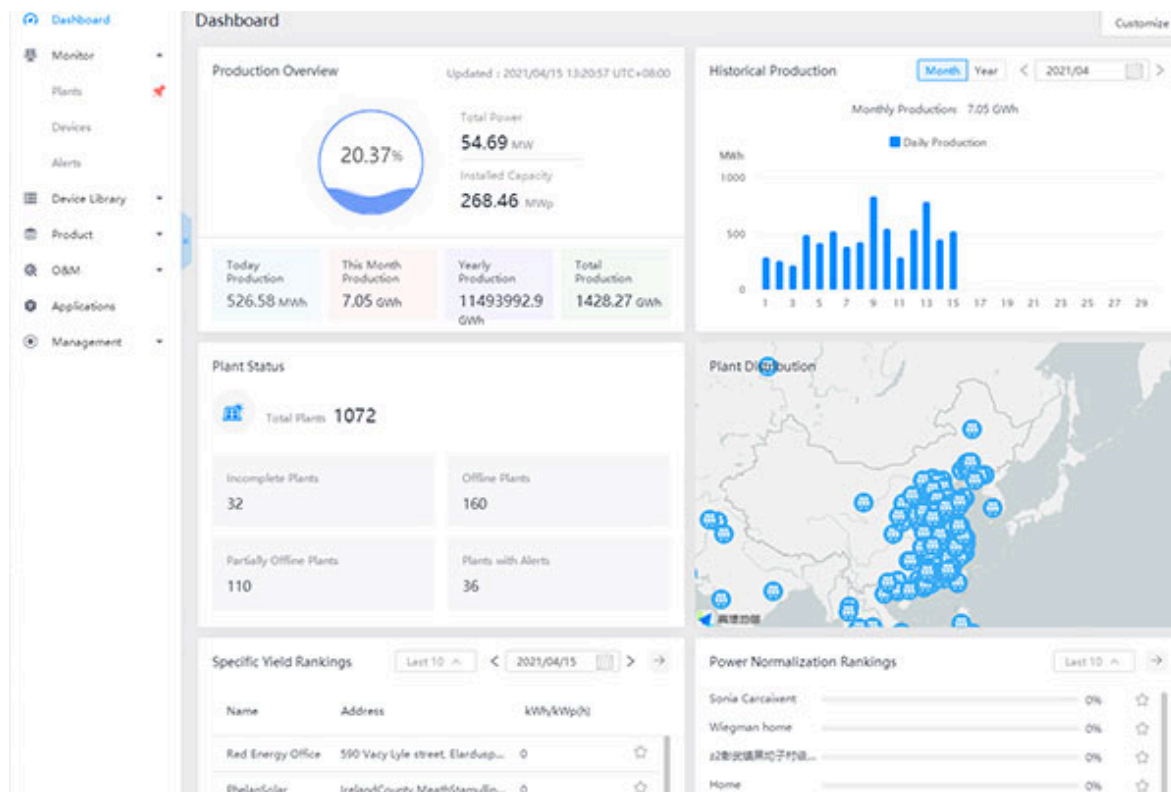


Рис. 1.8 Інтерфейс Solarman

Він інтегрується до Home Assistant [1], але надає лише обмежену кількість параметрів моніторингу і керування.

## РОЗДІЛ 2. ПРОГРАМНО-АПАРАТНА ЧАСТИНА

### 2.1 Збір даних з інвертору і батарей.

Оскільки більшість сучасних інверторів з'єднуються data-кабелем з портами BMS батарейних збірок, для більшої частини задач достатньо збирати дані з інвертора, який, в свою чергу, отримуватиме дані з батарей.

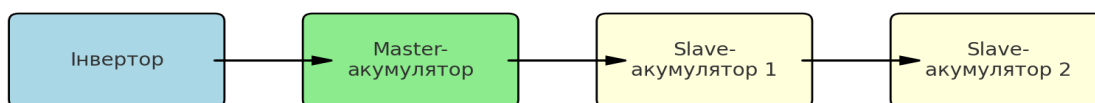


Рис. 2.1 Схема з'єднання інвертору і акумуляторів

Схема на Рис. 2.1 зображує з'єднання інвертору і декількох акумуляторів кабелями для передачі даних. BMS кожного зі Slave акумуляторів передає свої параметри (заряд акумулятора - SOC, State Of Charge, максимальний струм заряда-разряда та інші). BMS Master акумулятора збирає передані дані, враховує власні, підраховує зведені дані і передає їх інвертору – звичайно SOC збірки – це середній SOC всіх акумуляторів в збірці, а максимальний струм заряда-разряда – це сума струмів заряда-разряда для кожного акумулятора збірки.

Для моніторингу і керування інвертором Deue було випробувано і порівняно декілька систем. Їх переваги та недоліки наведені в Таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Переваги та недоліки систем керування інвертором

Назва	Переваги	Недоліки
Solarman	“Рідне” рішення інверторів Deue та деяких інших.	Без інтеграції з Home Assistant дає тільки самі

	<p>Легко встановлюється, налаштовується, дає базові можливості моніторингу і керування.</p> <p>Можливе підключення до Home Assistant і передача йому ряду параметрів.</p> <p>Безкоштовне – не потрібно купувати ані апаратного, ані програмного забезпечення.</p>	<p>базові можливості, дуже обмежена можливість автоматизації.</p> <p>Залежить від “хмарного” сервісу, що ускладнює роботу в разі перебоїв з інтернетом.</p> <p>У випадку підключення до Home Assistant передає тільки базові параметри.</p>
Solar Assistant	<p>Збирає детальні дані і з інвертора, і з батареї (підключається дата-кабелями і до інвертору, і до майстер-батареї).</p> <p>Має зручний web-інтерфейс, на якому можна керувати налаштуваннями інвертору, а також переглядати стан системи і зібрані дані у вигляді красивих елементів і графіків. Web-інтерфейс транслюється назовні і може бути доступним з інтернету.</p> <p>Працює на локальному сервері на основі Raspberry Pi, продовжує працювати і</p>	<p>Платний проект – доведеться придбати і сам програмний продукт, і плату Raspberry Pi для його встановлення.</p>

	<p>збирати дані у випадку відключення інтернету.</p> <p>Має власні можливості написання сценаріїв автоматизації.</p> <p>Інтегрується з Home Assistant (але для цього доведеться докласти зусилля).</p>	
Smart Deye Dongle (ESP32)	<p>Проект призначений для інтеграції з Home Assistant, легко встановлюється і налаштовується, передає йому найбільшу кількість параметрів і дозволяє найбільш детально налаштувати інвертор.</p> <p>Разом з проектом можна налаштувати і встановити елементи керування і оформлення для Home Assistant.</p>	<p>Платний проект – доведеться придбати плату ESP32 зі встановленим проектом і підключеним RS-485 – UART TTL.</p>

Для керування системою енергоспоживання було обрано Smart Deye Dongle, але, оскільки Solar Assistant було встановлено протягом довшого часу і їм було зібрано більше даних, то в наступних розділах буде проаналізовано дані, зібрані Solar Assistant.

Наразі Solar Assistant [3] і Smart Deye Dongle [5] підключені до інвертора одночасно (Рис. 2.2), керування і моніторинг можна здійснювати за допомогою будь-якого з цих рішень.

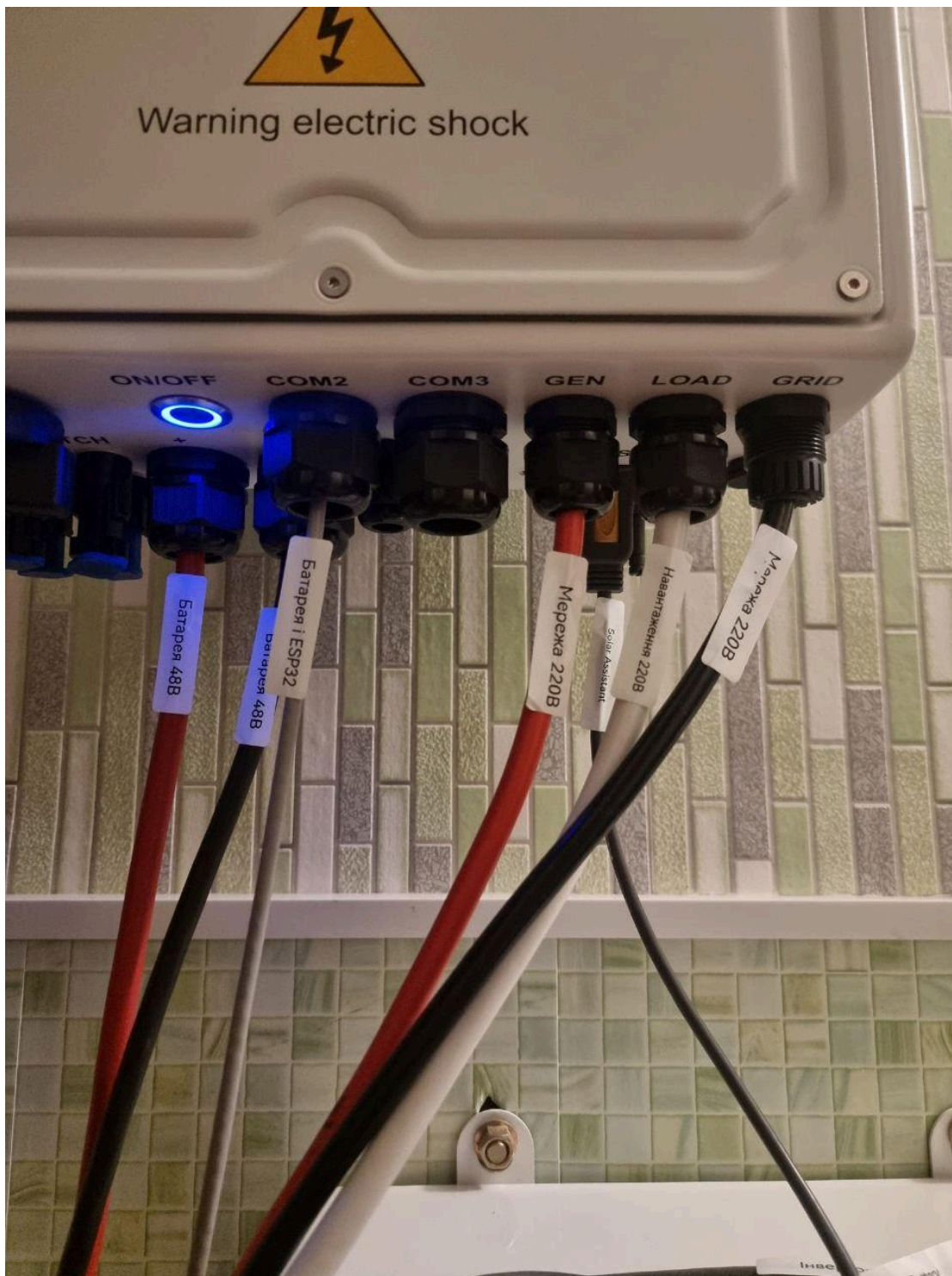


Рис. 2.2 Підключення до інвертору

На світлині видно підключення до інвертору. Solar Assistant підключено через порт RS-232 кабелем RS-232-to-USB (сірий кабель праворуч позаду). Інвертор обладнаний комбінованим портом CAN і RS-485, два контакта в роз'ємі RJ-45 використовується для передачі даних CAN, ще два – для RS-485. Оскільки було прийнято рішення задіяти і CAN (для підключення Master-батареї), і RS-485 (для підключення ESP32 зі Smart Deye Dongle), то було зібрано сплітер (Рис. 2.3), який ділить сигнали.

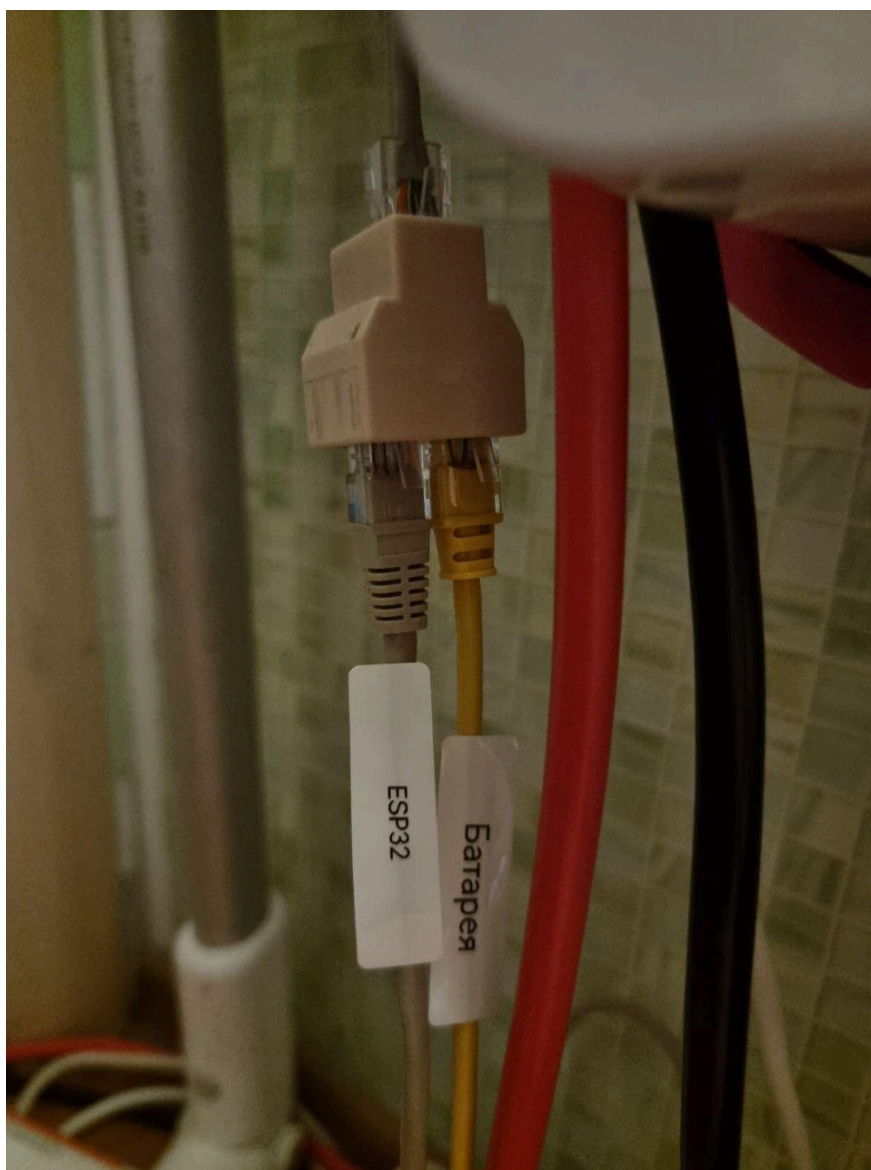


Рис. 2.3. Сплітер

Як видно на світлині, в сплітер входить кабель з комбінованими даними CAN і RS-485 (згори), а виходить окремо CAN (жовтий, на батарею) і RS-485 (сірий, на ESP32 зі Smart Deye Dongle).

Для встановлення і роботи Solar Assistant було обрано платформу Orange Pi 3 LTS (характеристики в таблиці 2.2), тому що вона:

- Офіційно підтримується Solar Assistant,
- Має досить непогані характеристики,
- Має HDMI-вихід, через який Solar Assistant може виводити зображення (тобто є можливість підключення зовнішнього монітору безпосередньо до пристрою),
- Відносно недорога, дешевше ніж Raspberry Pi.

Таблиця 2.2 Характеристики Orange PI 3 LTS

Назва	Значення
Процесор (CPU)	Allwinner H6, 4-ядерний ARM Cortex-A53, до 1.8 ГГц
Графічний процесор (GPU)	ARM Mali-T720 MP2
Оперативна пам'ять (RAM)	2 ГБ DDR3
Вбудована флеш-пам'ять	8 ГБ eMMC (опціонально)
Слот для карт пам'яті	MicroSD (до 128 ГБ)
Мережа	Gigabit Ethernet
Wi-Fi	802.11 b/g/n
Bluetooth	5.0
HDMI	HDMI 2.0 (підтримка до 4K @ 60fps)
USB	3 x USB 2.0 Type-A, 1 x USB 3.0 Type-A, 1 x USB

	Type-C (живлення)
ІЧ-ресивер	Є
Аудіо	Вбудований аудіовихід через HDMI, вихід на 3.5 мм
GPIO	26-піновий роз'єм
Живлення	USB Type-C (5В/3А)
Розміри плати	90 x 60 мм
Операційна система	Android, Ubuntu, Debian
Підтримка мультимедіа	Відтворення 4K @ 60fps, апаратне декодування H.265/H.264



Рис. 2.4. Orange PI зі встановленим Solar Assistant

На Рис. 2.4 плата Orange Pi, на яку встановлено Solar Assistant. До USB-портів під'єднано дата-кабелі від інвертору (RS232-USB) і батареї (RS232-USB).

Для встановлення і роботи Home Assistant можливе використання різних рішень: HA можна поставити в NAS за допомогою docker або піднявши на NAS віртуальну машину; також можливо підняти окремий міні-сервер на Raspberry Pi 4 (Рис. 2.5) або 5.

Таблиця 2.3 Характеристики Raspberry Pi 4

Назва	Значення
Процесор (CPU)	Broadcom BCM2711, 4-ядерний ARM Cortex-A72, 1.5 ГГц
Оперативна пам'ять (RAM)	4 ГБ LPDDR4
Графічний процесор (GPU)	VideoCore VI, підтримка OpenGL ES 3.0
Порти USB	2 x USB 3.0, 2 x USB 2.0
HDMI	2 x Micro HDMI (підтримка до 4K @ 60fps)
Мережа	Gigabit Ethernet
Wi-Fi	802.11 b/g/n/ac (двохдіапазонний 2.4 ГГц і 5 ГГц)
Bluetooth	5.0
Слот для карт пам'яті	MicroSD (для зберігання ОС та даних)
GPIO	40-піновий роз'єм
Аудіо	Комбінований аудіо/відеовихід (3.5 мм) та HDMI
Живлення	USB Type-C (5В/3А)
Відео та мультимедіа	Підтримка декодування H.265 (4Kp60), H.264 (1080p60)
Підтримувані ОС	Raspberry Pi OS, Ubuntu, інші Linux дистрибутиви

Охолодження	Пасивне або активне (рекомендується)
Розміри плати	85.6 мм x 56.5 мм



Рис. 2.5 Raspberry PI зі встановленим Home Assistant

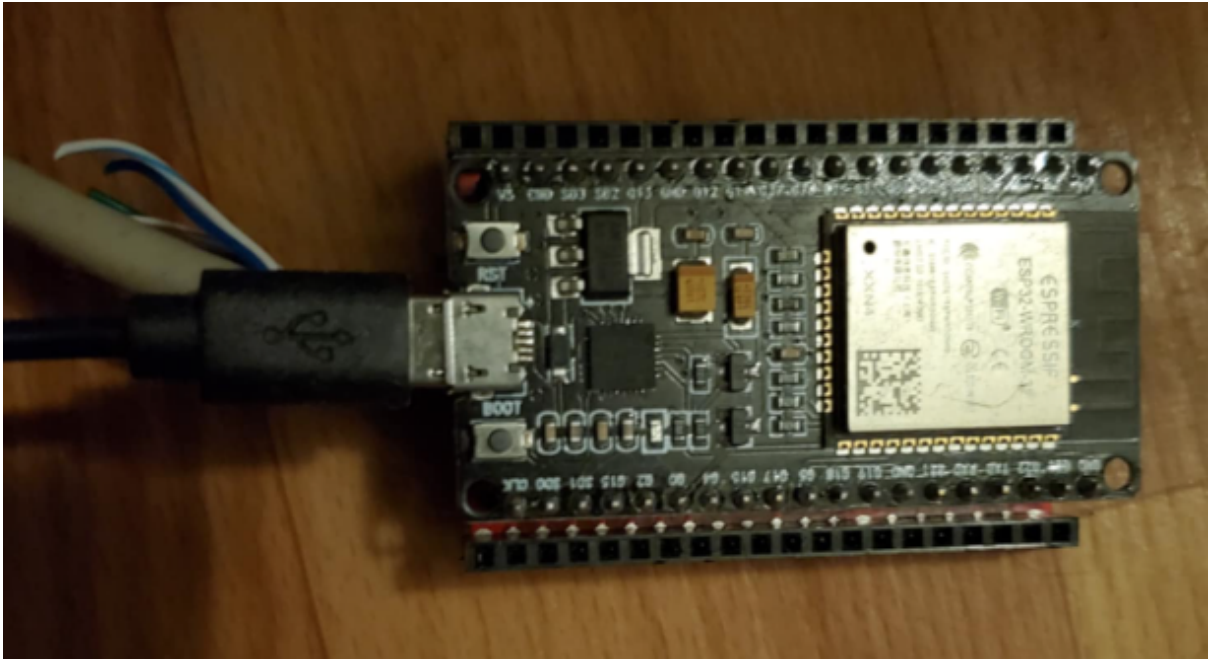


Рис. 2.6 Smart Deye Dongle (ESP32)

На Рис. 2.6 наведено плату ESP32 зі встановленим проектом Smart Deye Dongle, до якої (зі зворотного боку) під'єднано RS-485 – UART TTL, до якого, в свою чергу, під'єднано кабель для даних, що йде до порту RS-485 інвертору (через сплітер).

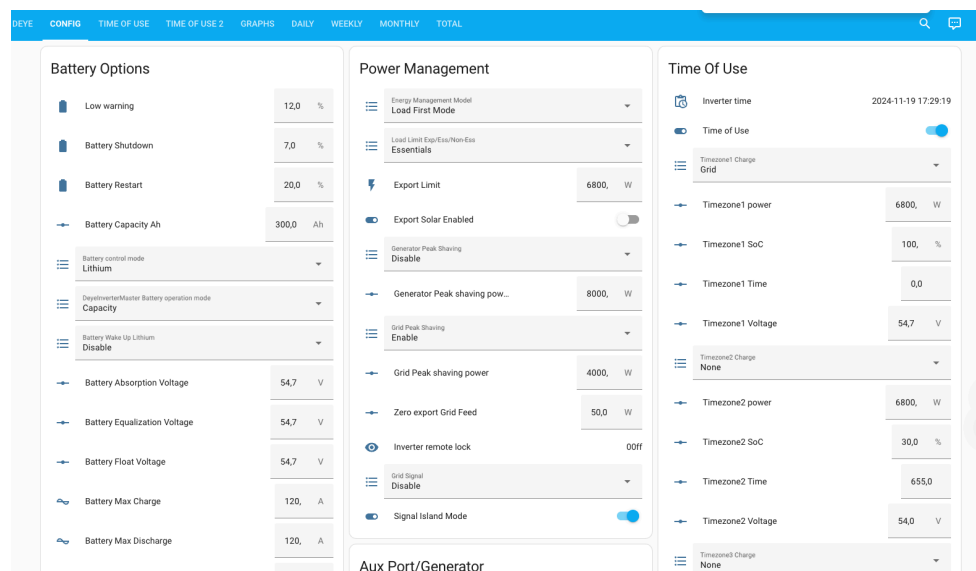


Рис. 2.7 Керування інвертором через Home Assistant

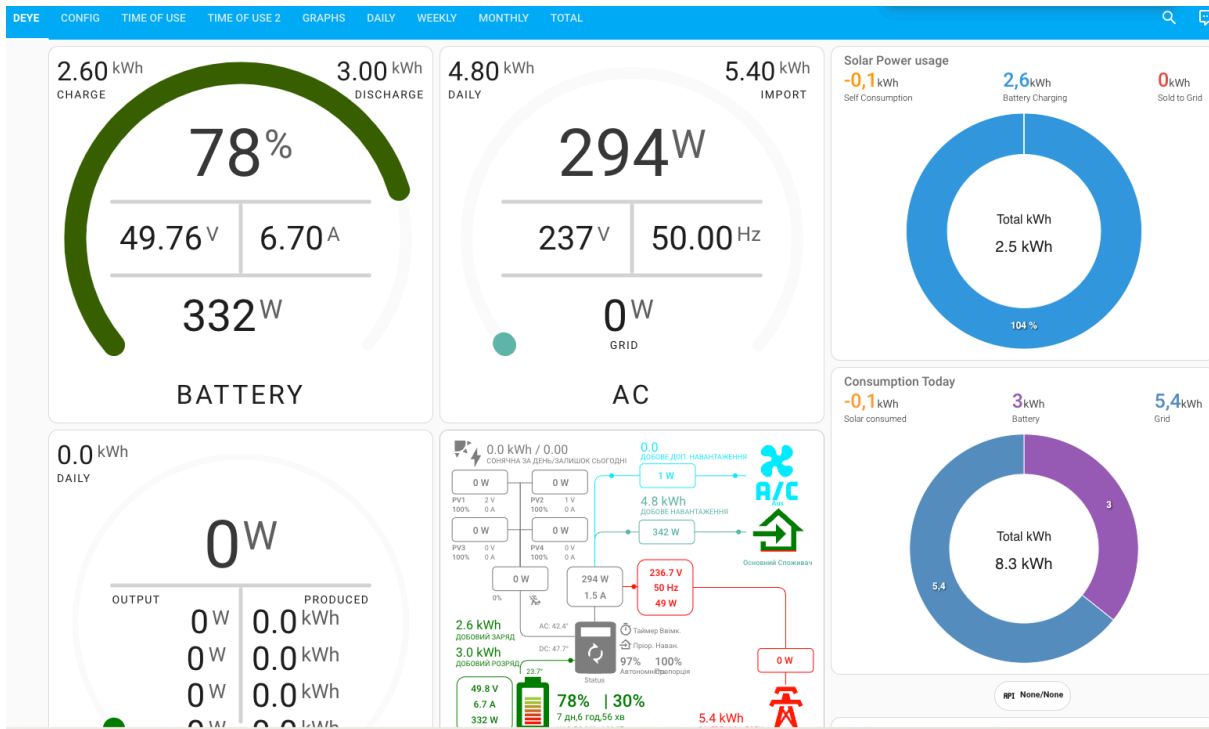


Рис. 2.8 Віджети Home Assistant для моніторингу інвертору

На Рис. 2.7 і Рис. 2.8 відповідно частина налаштувань інвертора, які можна здійснити за допомогою Smart Deye Dongle через Home Assistant і віджети, які дозволяють моніторити частину параметрів.

## 2.2 Моніторинг даних батарей.

Але і можливість моніторити і керувати батареями іноді стає у нагоді. У збірці було використано батареї з PACE BMS. Ця BMS має декілька портів для обміну даними:



Рис. 2.9 Підключення до батареї

На Рис. 2.9 підключення Master-батареї збірки: зліва направо: RS-485 (підключений до ESP32, подробиці нижче), CAN (підключений до інвертору через сплітер), RS-232 (підключення до Solar Assistant), RS-485 для внутрішньої комунікації (підключено до батареї Slave 1, див. схему 2.1.1)

Для підключення PACE BMS до Home Assistant було розглянуто декілька варіантів:

1. Проект Tertiush/bmspace [8] – вимагає підключення BMS дата-кабелем безпосередньо до Home Assistant, що не завжди зручно.
2. Проект syssi/esphome-seplos-bms [6] – підтримує бездротове підключення через ESP-32 з використанням протоколу, яким PACE BMS комунікує через порт RS-232. Після деякої кастомізації проект запрацював, але мав декілька недоліків:

- a. Дані з батареї передавалися на Home Assistant, але можливості змінювати параметри батареї не було,
  - b. При підключенні до Master батареї передавалися тільки дані з неї. Для отримання даних зі Slave батареї довелося б придбати і налаштувати ще один пристрій ESP-32 з RS-232 – UART TTL.
3. Проект `syssi/esphome-race-bms` [7], розрахований на підключення до порту RS-485. Після деякої програмної і апаратної кастомізації, вдалося завести таким чином, щоб один пристрій моніторив і керував всіма батареями. Для підключення декількох батарей був використаний пристрій LILYGO® T-CAN485 (Рис. 2.10), який вже містить ESP32 і RS-485 – UART TTL. Були під'єднані дроти згідно зі схемою на Рис. 2.1. Використовує протокол RACE Modbus [9]. При такому підключенні один пристрій може моніторити і керувати декількома батареями – але має бути з'єднаний дротом з кожною з них. Прошивка ESP32 з проекту була модифікована таким чином, щоб врахувати наявну конфігурацію: 3 батареї, кожна з яких складається з 15 комірок.

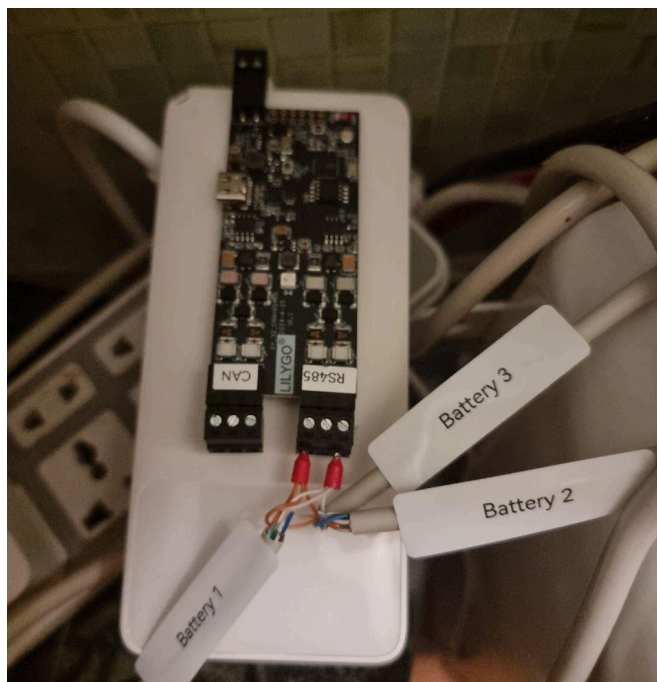


Рис. 2.10 Апаратне рішення для підключення LILYGO до батарей

До Slave-батареї (Рис. 2.11) під'єднано набагато менше кабелів даних, ніж до Master.

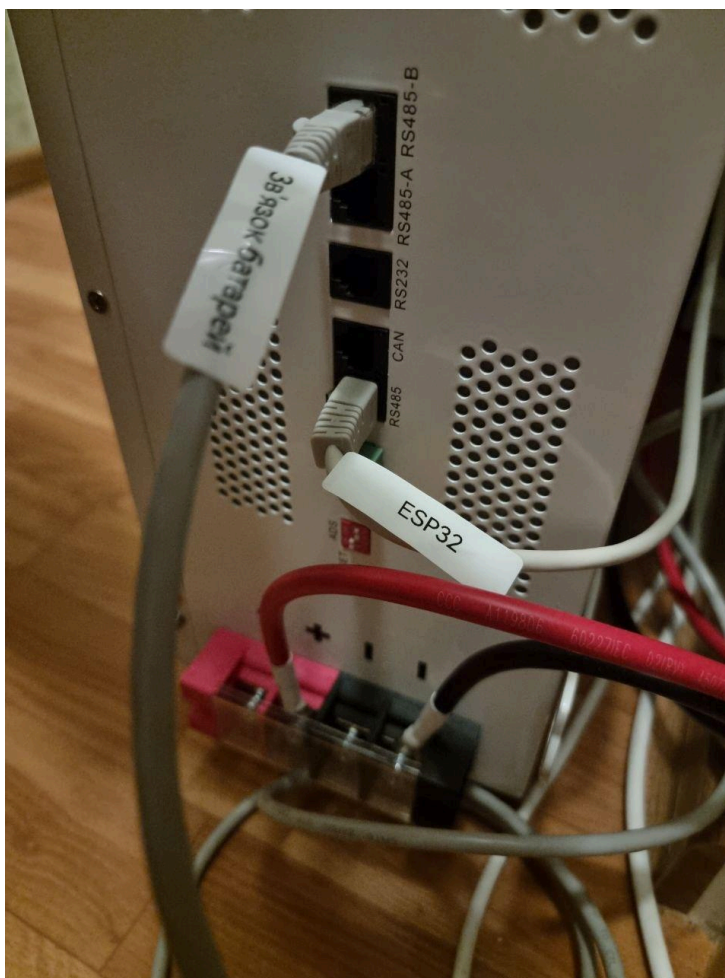


Рис. 2.11 Під'єднання до Slave батареї

На рисунку вище видно, що під'єднано тільки два дата-кабеля: кабель моніторингу з LILYGO і кабель для з'єднання батарей, який з'єднує Slave 1 і Slave 2. Solar Assistant здатен збирати інформацію, будучи підключеним тільки до Master батареї, тому потреби підключати його до Slave батареї нема.



Рис. 2.12. Апаратна частина системи в зібраному стані

На Рис. 2.12 загальний вигляд збірки з інвертора і трьох батарей. Батареї з'єднані паралельно, таким чином напруга збірки дорівнює напрузі кожної батареї (48 вольт), проте ємність і потужність сумуються.



















	Bank 3 cell voltage 4	3,317 V
	Bank 3 cell voltage 5	3,317 V
	Bank 3 cell voltage 6	3,282 V
	Bank 3 cell voltage 7	3,318 V
	Bank 3 cell voltage 8	3,317 V
	Bank 3 cell voltage 9	3,316 V
	Bank 3 charging	Увімкнено
	Bank 3 charging cycles	96
	Bank 3 charging operation	Вимкнено
	Bank 3 current	-2,41 A
	Bank 3 delta cell voltage	0,036 V
	Bank 3 design capacity	100,00 Ah
	Bank 3 discharging	Увімкнено
	Bank 3 discharging operation	Увімкнено
	Bank 3 environment temperature	24,5 °C
	Bank 3 fault status bitmask	3 584
	Bank 3 faults	
	Bank 3 full capacity	100,00 Ah

Рис. 2.13 Моніторинг батарей з Home Assistant

Bank 1 pack undervoltage p...	40500	mV
Bank 1 pack undervoltage pr...	1,0	s
Bank 1 pack undervoltage p...	44200	mV
Bank 1 short circuit protect d...	300	us
Bank 1 state of charge alarm...	5,0	%
Bank 2 balance start cell vo...	3400,0	mV
Bank 2 balance start delta v...	30,0	mV
Bank 2 cell overvoltage alarm	3550,0	mV
Bank 2 cell overvoltage prot...	3650,0	mV
Bank 2 cell overvoltage prote...	1,0	s
Bank 2 cell overvoltage prot...	3380,0	mV
Bank 2 cell sleep delay time	5,0	min
Bank 2 cell sleep voltage	3100,0	mV

Рис. 2.14 Керування батареєю з Home Assistant

На Рис. 2.13 і Рис. 2.14, відповідно, параметри батарей, які можна моніторити за допомогою `syssi/esphome-pacc-bms` через Home Assistant, і параметри батарей, які можна змінювати.

### 2.3 Використання даних моніторингу і елементів керування.

Home Assistant дозволяє створювати сценарії “розумного будинку”, які використовують дані з елементів моніторингу і може динамічно змінювати параметри, якими можна керувати [3, 12, 13, 14].

Дані моніторингу, які можна використовувати безпосередньо:

- Залишковий заряд акумулятору (для прогнозу, чи вистачить заряду до ночі, з урахуванням передбачення споживання)
- Напруга в мережі (у випадку нестабільної напруги або відключення електрики можливо це врахувати і зарезервувати більший заряд в акумуляторах)
- Потужність споживання (можна використати для передбачення споживання)
- Прогноз погоди (можна використати для прогнозування генерації сонячних панелей)
- Температура в приміщенні (можна використати для прогнозування необхідності додаткового нагріву або охолодження, що може значно вплинути на споживання)
- Та інші параметри.

Параметри і режими роботи інвертора, які можна задавати і динамічно змінювати:

- Зарядити акумулятор повністю
- Зарядити акумулятор до заданого заряду (наприклад, зарядити акумулятор до 75%)
- Працювати від акумулятора, поки він не досягне заданого залишкового заряду, після цього працювати від мережі, але не заряджати акумулятор
- Задати чи змінити максимальну потужність, якою заряджається акумулятор
- Задати чи змінити максимальну потужність, яку інвертор бере з мережі (наприклад, ми знаємо, що більше ніж 5 кВт наша мережа не віддасть, ми можемо завдати максимальну потужність 4,5 кВт. Припустимо, наш акумулятор заряджається з потужністю 3 кВт, і ми ще додатково підключили навантаження на 2.5 кВт. В такому

випадку інвертор зменшить потужність заряду акумуляторів до 2 кВт, щоб не перевищити задані 4.5 кВт)

- Розподілити потужність, що споживається, між мережею і акумулятором, тобто брати частину потужності з мережі, частину від акумулятору
- Керування деякими електроприладами: деякі можуть керуватися безпосередньо з Home Assistant, наприклад, якщо велика сонячна генерація, а батареї майже заряджені, можна увімкнути “розумний” бойлер для використання надлишків генерації. Інші прилади можуть керуватися опосередковано, через “розумні” розетки. Це можна використати і для переносу частини споживання на нічний час з надлишковою генерацією.

#### **2.4 Використання доповнень Home Assistant для інтеграції сторонніх сервісів.**

Крім безпосереднього керування “розумними” приладами, Home Assistant дає можливість встановлення доповнень для інтеграції сервісів. Для моніторингу і керування електрикою було створено бота в месенджері telegram. Бота було інтегровано в Home Assistant. Був написаний скрипт, який надсилає зведену інформацію про стан енергосистеми щогодинно, за запитом або за подією, наприклад, у разі відключення світла.

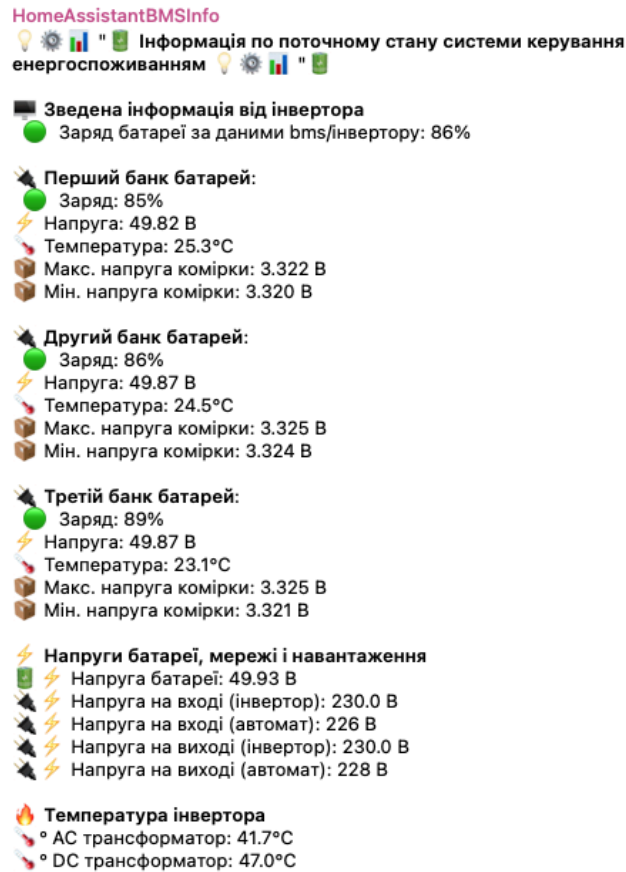


Рис. 2.15 Приклад повідомлення tg-бота

На Рис. 2.15 повідомлення бота з інформацією про стан системи керування електроспоживанням. Параметри повідомлення змінюються в залежності від стану, наприклад, колір кульки змінюється в залежності від заряду акумулятору. Програмний код для tg-бота наведено на Рис. 2.16.

```

alias: telegram send each hour
description: ""
triggers:
  - hours: /1
    | trigger: time_pattern
conditions: []
actions:
  - data:
      message: >-
        📢🔌🔋🔌🔌{{"* Інформація по поточному стану системи керування
        енергоспоживанням *"}}📢🔌🔌🔌🔌{{{- "\n" -}}}{{- "\n" -}}📢{{"*Зведена
        інформація від інвертора*"}}{{{- "\n" -}}}{% set charge1 =
        states('sensor.deyeinvertermaster_battery_soc') | int %}{% if charge1 >
        80 %}🟢{% elif charge1 > 40 %}🟡{% elif charge1 > 20 %}🟠{% else
        %}🔴{% endif %}Заряд батареї за даними bms/інвертору: {{ charge1
        }}%{{{- "\n" -}}}{{- "\n" -}}

        ⚡{{"*Перший банк батарей*"}}: {{{- "\n" -}}}{% set charge2 =
        states('sensor.pace_bms_bank_1_state_of_charge') | int %}{% if charge2
        > 80 %}🟢{% elif charge2 > 40 %}🟡{% elif charge2 > 20 %}🟠{% else
        %}🔴{% endif %}Заряд: {{ charge2 }}%{{{- "\n" -}}}{% set voltage1 =
        states('sensor.pace_bms_bank_1_total_voltage') | float %}Напруга: {{
        voltage1 }}V{{{- "\n" -}}}{% set temperature1 =
        states('sensor.pace_bms_bank_1_mosfet_temperature') | float %}
        Температура: {{ temperature1 }}°C{{{- "\n" -}}}{% set max_voltage1 =
        states('sensor.pace_bms_bank_1_max_cell_voltage') | float %}Макс. напруга комірки: {{
        max_voltage1 }}V{{{- "\n" -}}}{% set min_voltage1 =
        states('sensor.pace_bms_bank_1_min_cell_voltage') | float %}Мін. напруга комірки: {{
        min_voltage1 }}V{{{- "\n" -}}}{%-
        "\n" -}}⚡{{"*Другий банк батарей*"}}: {{{- "\n" -}}}{% set charge3 =
        states('sensor.pace_bms_bank_2_state_of_charge') | int %}{% if charge3 >
        80 %}🟢{% elif charge3 > 40 %}🟡{% elif charge3 > 20 %}🟠{% else
        %}🔴{% endif %}Заряд: {{ charge3 }}%{{{- "\n" -}}}{% set voltage2 =
        states('sensor.pace_bms_bank_2_total_voltage') | float %}Напруга: {{
        voltage2 }}V{{{- "\n" -}}}{% set temperature2 =
        states('sensor.pace_bms_bank_2_mosfet_temperature') | float %}
        Температура: {{ temperature2 }}°C{{{- "\n" -}}}{% set max_voltage2 =
        states('sensor.pace_bms_bank_2_max_cell_voltage') | float %}Макс. напруга комірки: {{
        max_voltage2 }}V{{{- "\n" -}}}{% set min_voltage2 =
        states('sensor.pace_bms_bank_2_min_cell_voltage') | float %}Мін. напруга комірки: {{
        min_voltage2 }}V{{{- "\n" -}}}{%-
        "\n" -}}

```

Рис. 2.16 Програмний код для tg-бота

### РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ДАНИХ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СПОЖИВАННЯ І ГЕНЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ

Для аналізу використовувалася система з гібридного інвертору, двох акумуляторів із заявленими характеристиками 48 вольт, 100 ампергодин, підключених паралельно, системи моніторингу Solar Assistant і пристрої вимірювання.

#### 3.1 Визначення реальної ємності батарей з урахуванням ККД перетворення енергії.

Теоретична ємність батарейної збірки дорівнює сумі ємностей підключених батарей. У нашій системі використовуються дві батареї, кожна з напругою 48 вольт і ємністю 100 ампергодин, що в загальному дає 9600 ватгодин ( $48 \text{ В} \cdot 100 \text{ А} \cdot \text{год} \cdot 2$ ).

$$\text{Дано: } \begin{cases} N = 2 \\ V = 48 \text{ В} \\ C_{\text{батар}} = 100 \text{ А} \cdot \text{год} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{теор}} &= N \times V \times C_{\text{батар}} = 2 \times 48 \text{ В} \times 100 \text{ А} \cdot \text{год} \\ &= 9600 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 9,6 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (3.1.1) \end{aligned}$$

Однак фактична ємність буде меншою через ряд чинників, які впливають на ефективність перетворення енергії.

По-перше, слід враховувати ККД перетворення постійного струму батарей у змінний струм мережі. Інвертор, який використовується для цього перетворення, має певні втрати, що знижує загальну ефективність системи.

По-друге, ємність літійзалізофосфатних (LiFePO<sub>4</sub>) батарей залежить від робочого діапазону напруги. Для таких батарей робочий діапазон

складає від 3.6 до 2.5 вольт на елемент. Однак система управління батареєю (BMS) припиняє розрядку при досягненні напруги 2.7 вольт, що зменшує доступну ємність. Крім того, у процесі користування можуть виникати значні навантаження, що також впливає на зменшення віддачі енергії. Реальне використання батареї завершується, коли залишкова ємність досягає 10%, а не після повного розрядження до рівня спрацювання запобіжника BMS, що також зменшує загальну віддану енергію.

Реальна ємність батарей вимірювалася за допомогою “розумного” автомату (Рис. 3.1) з бездротовим пристроєм моніторингу, підключеного до мережевого виходу інвертора і керованого через системи розумного будинку Mi Home і Home Assistant.



Рис. 3.1 “Розумний” автомат

При розрядці батарей з 100% до 10% віддана ємність склала 7.2 кіловат годин.

$$C_{\text{відд}} = 7,2 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (3.1.2)$$

Розрахуємо ККД.

$$\begin{aligned} \eta &= \left( \frac{E_{\text{відд}}}{E_{\text{теор}}} \right) \times 100\% \\ &= \left( \frac{7,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}}{9,6 \text{ кВт} \cdot \text{год}} \right) \times 100\% \\ &= \left( \frac{7,2}{9,6} \right) \times 100\% \\ &= 0,75 \times 100\% \\ &= 75\% \quad (3.1.3) \end{aligned}$$

Таким чином, загальний ККД батарейної збірки, з урахуванням усіх перелічених обмежень, становить близько 75% від теоретичної ємності.

### 3.2 Аналіз споживання за сезонами

За допомогою Solar Assistant була зібрана статистика за період з лютого по жовтень 2024го року, наведена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Статистика споживання електроенергії по місяцям

Місяць, 2024 рік	Споживання, кВт*ч
Лютий	118
Березень	205
Квітень	186
Травень	260
Червень	337
Липень	366

Серпень	364
Вересень	205
Жовтень	256

В розрахунках не будемо брати лютий до уваги, тому що, очевидно, ще не все навантаження було підключено.

В літні місяці споживання значно більше через використання кондиціонерів для охолодження.

$$\begin{aligned}\bar{E}_{\text{літо}} &= \frac{1}{3} (E_{\text{червень}} + E_{\text{липень}} + E_{\text{серпень}}) = \\ &= \frac{1}{3} (337 + 366 + 364) = \frac{1067}{3} \approx 355,67 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (3.2.1)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{E}_{\text{інші}} &= \frac{1}{5} (E_{\text{березень}} + E_{\text{квітень}} + E_{\text{травень}} + E_{\text{вересень}} + E_{\text{жовтень}}) \\ &= \frac{1}{5} (205 + 186 + 260 + 205 + 256) \\ &= \frac{1112}{5} = 222,4 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (3.2.2)\end{aligned}$$

$$\Delta\% = \left( \frac{\bar{E}_{\text{літо}} - \bar{E}_{\text{інші}}}{\bar{E}_{\text{інші}}} \right) \times 100\% \quad (3.2.3)$$

Підставив в 3.2.3 значення з 3.2.1 і 3.2.2, отримаємо:

$$\begin{aligned}\Delta\% &= \left( \frac{355,67 - 222,4}{222,4} \right) \times 100\% \\ &= \left( \frac{133,27}{222,4} \right) \times 100\% \quad (3.2.4) \\ &\approx 59,9\%\end{aligned}$$

Порахуємо середнє денне споживання. Влітку воно складе:

$$\overline{E}_{\text{літо}} = \frac{E_{\text{літо}}}{D_{\text{літо}}} = \frac{1067}{92} \approx 11,59 \text{ кВт} \cdot \text{год/день} \quad (3.2.5)$$

Це приблизно у півтора рази більше, ніж виміряна віддана ємність батарейної збірки.

В інші місяці середнє споживання склало:

$$\overline{E}_{\text{літо}} = \frac{E_{\text{літо}}}{D_{\text{літо}}} = \frac{1067}{92} \approx 11,59 \text{ кВт} \cdot \text{год/день} \quad (3.2.6)$$

### 3.3 Аналіз споживання енергії за днями тижня

Перевірка гіпотези, що у вихідні дні споживання в середньому вище, ніж в будні, тому що:

- Більше часу і більше людей вдома,
- Приготування їжі на кілька днів із застосуванням електрообладнання.

Було проаналізовано дані, отримані від інвертора через Solar Assistant, за останні декілька тижнів, наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 Статистика споживання електроенергії по дням

Дата	Споживан ня, кВт·год	Дата	Споживан ня, кВт·год	Дата	Споживан ня, кВт·год
Жовт 14	8,5	<b>Жовт 27</b>	8,6	Лист 14	6,4
Жовт 15	7,8	Жовт 28	7,8	Лист 15	7,2
Жовт 16	7,6	Жовт 29	7,6	<b>Лист 16</b>	9,9
Жовт 17	8,3	Жовт 30	6,7	<b>Лист 17</b>	6,9
Жовт 18	8,7	<b>Лист 02</b>	10,2	Лист 18	7,1
<b>Жовт 19</b>	10,7	<b>Лист 03</b>	12,4	Лист 19	7,4
<b>Жовт 20</b>	9,2	Лист 04	12,4	Лист 20	7,3
Жовт 21	8,1	Лист 08	6,0	Лист 21	6,6
Жовт 22	10,0	<b>Лист 09</b>	12,8	Лист 22	8,3
Жовт 23	8,4	<b>Лист 10</b>	7,9	<b>Лист 23</b>	8,9
Жовт 24	8,0	Лист 11	7,7	<b>Лист 24</b>	7,4
Жовт 25	8,3	Лист 12	6,1	Лист 25	7,3
<b>Жовт 26</b>	11,9	Лист 13	7,2	Лист 26	6,5

Три дні (5, 6, 7 листопада) було проігноровано через проблеми зв'язку інвертора з Solar Assistant і, відповідно, нульові значення. Також було проігноровано дні, в які споживання було менше 5 кВт·год.

Перевіримо гіпотезу зростання споживання на вихідні, підрахувавши коефіцієнт кореляції Пірсона, для цього напишемо програму на Python.

```

import pandas as pd

data = {
    'Дата': [
        'Жовт 14', 'Жовт 15', 'Жовт 16', 'Жовт 17', 'Жовт 18', 'Жовт 19', 'Жовт 20', 'Жовт 21',
        'Жовт 22', 'Жовт 23', 'Жовт 24', 'Жовт 25', 'Жовт 26', 'Жовт 27', 'Жовт 28', 'Жовт 29', 'Жовт 30',
        'Лист 02', 'Лист 03', 'Лист 04', 'Лист 08', 'Лист 09', 'Лист 10', 'Лист 11',
        'Лист 12', 'Лист 13', 'Лист 14', 'Лист 15', 'Лист 16', 'Лист 17', 'Лист 18', 'Лист 19',
        'Лист 20', 'Лист 21', 'Лист 22', 'Лист 23', 'Лист 24', 'Лист 25', 'Лист 26'
    ],
    'Споживання (кВт·год)': [
        8.5, 7.8, 7.6, 8.3, 8.7, 10.7, 9.2, 8.1, 10.0, 8.4, 8.0, 8.3, 11.9, 8.6, 7.8, 7.6, 6.7,
        10.2, 12.4, 12.4, 6.0, 12.8, 7.9, 7.7, 6.1, 7.2, 6.4, 7.2, 9.9, 6.9, 7.1, 7.4, 7.3, 6.6,
        8.3, 8.9, 7.4, 7.3, 6.5
    ]
}

# Створюємо DataFrame
df = pd.DataFrame(data)

# Перетворюємо дати на стандартний формат для роботи з ними
df['Дата'] = df['Дата'].apply(lambda x: x.replace('Жовт', 'Ост').replace('Лист', 'Nov'))
df['Дата'] = pd.to_datetime(df['Дата'] + ' 2024', format='%b %d %Y')

# Фільтруємо дані - залишаємо лише дні з споживанням > 5 кВт·год
df_filtered = df[df['Споживання (кВт·год)'] > 5]

# Додаємо інформацію про вихідні дні (субота та неділя)
df_filtered['Вихідний'] = df_filtered['Дата'].apply(lambda x: 1 if x.weekday() in [5, 6] else 0)

# Розрахунок кореляції між вихідним і споживанням
correlation = df_filtered[['Вихідний', 'Споживання (кВт·год)']].corr()

print("Кореляція між вихідним днем і споживанням електроенергії:")
print(correlation.loc['Вихідний', 'Споживання (кВт·год)'])

```

Рис. 3.2 Лістинг програми для розрахунку кореляції

В результаті роботи програми, Лістинг якої надано на Рис. 3.2, ми отримали значення кореляції  $r=0,528$ , що показує на помірне зростання споживання у вихідні і таким чином підтверджує нашу гіпотезу.

Підрахуємо середнє споживання в залежності від дня тижня.

1. Порахували середнє споживання у будній день.

$$\overline{C_{\text{weekday}}} = \frac{1}{n_{\text{weekday}}} \sum_{i \in \text{weekday}} C_i = 7,75 \text{ кВт}\cdot\text{год} \quad (3.3.3)$$

2. Порахували середнє споживання у вихідний день.

$$\overline{C_{\text{weekend}}} = \frac{1}{n_{\text{weekend}}} \sum_{i \in \text{weekend}} C_i = 9,73 \text{ кВт}\cdot\text{год} \quad (3.3.4)$$

Зауваження: в цих розрахунках добове споживання виявилось дещо більшим, ніж в 3.2.6, ймовірно через те, що ми брали дані за місяць, не виключаючи дні, коли не було зв'язку між інвертором і пристроєм моніторингу. В подальших розрахунках будемо користуватися значеннями 3.3.3 і 3.34.

### 3.4 Розрахунок можливої генерації сонячних панелей

Повні розрахунки можливої генерації сонячних панелей виглядають так: [10, 11, 15, 17, 18, 19]:

1. Сонячний деклінаційний кут в залежності від дати:

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin \left( \frac{360^\circ}{365} \times (284 + n) \times \frac{\pi}{180^\circ} \right)$$

2. Сонячний годинний кут при заході сонця:

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi \times \tan \delta)$$

3. Косинус кута падіння сонячних променів на похилу поверхню:

$$\cos \theta = \sin \delta \times \sin(\phi - \beta) + \cos \delta \times \cos(\phi - \beta) \times \cos \omega$$

4. Косинус зенітного кута:

$$\cos \theta_z = \cos \phi \times \cos \delta \times \cos \omega + \sin \phi \times \sin \delta$$

5. Коефіцієнт для прямої радіації:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$$

6. Модуляція сонячної радіації за рахунок відстані Земля-Сонце:

$$E_0 = 1 + 0.033 \times \cos \left( \frac{360^\circ n}{365} \times \frac{\pi}{180^\circ} \right)$$

7. Екстратерестральна сонячна константа:

$$G_{sc} = 1367 \text{ Вт/м}^2$$

8. Добова екстратерестральна радіація на горизонтальну поверхню:

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 \times G_{sc} \times E_0}{\pi} \times (\cos \phi \times \cos \delta \times \sin \omega_s + \omega_s \times \sin \phi \times \sin \delta)$$

9. Добова інсоляція на похилій поверхні:

$$H_T = H \times \left[ \left( \frac{H_b}{H} \times R_b \right) + \left( 1 - \frac{H_b}{H} \right) \times \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho_g \times \frac{1 - \cos \beta}{2} \right]$$

10. Використовувалася спрощена формула для добової інсоляції на похилій поверхні:

$$H_T = H \times \left[ \frac{H_b}{H} \times R_b + \left( 1 - \frac{H_b}{H} \right) \times \frac{1 + \cos \beta}{2} \right]$$

11. Рахувалися пікові сонячні години:

$$PSH = \frac{H_T}{I_{STC}}$$

12. Очікувана добова генерація електроенергії:

$$E_{\text{добова}} = P_{\text{сумарна}} \times PSH \times \eta$$

Але для наших цілей вистачає спрощених (приблизних) розрахунків.

Маємо 6 панелей заявленою потужністю 580 Вт кожна, які кріпляться на стіні, направлених на південний схід, під кутом 25° від вертикалі (65° від горизонталі). Широта Харкова: приблизно 50° північної широти.

Середньодобова генерація енергії одній панелі:

$$E_{\text{добова}} = P \times PSH \quad (3.4.1)$$

де P - потужність сонячної панелі, а PSH - пікові сонячні години, ця величина залежить від місяця.

Таблиця 3.3 Значення PSH

Місяць	PSH базова (год/день)
Січень	1,2
Лютий	2,0
Березень	2,9
Квітень	4,0
Травень	5,0
Червень	5,5
Липень	5,4
Серпень	4,6
Вересень	3,5
Жовтень	2,5
Листопад	1,5
Грудень	1,0

Наведені в Табл. 3.3 середні значення PSH для Харкова є орієнтовними.

Коригування помісячної інсоляції з урахуванням азимутального кута.

Стіна з панелями спрямована на південний схід під кутом  $-45^\circ$  від оптимального (південного) напрямку.

$$E_{\text{скоригована}} = E_{\text{базова}} \times (1 - \delta) \quad (3.4.3)$$

Також азимутальний кут впливає на PSH, в залежності від місяця. Застосуємо коригування, використовуючи коефіцієнти для Харкова.

В Табл. 3.4 надані скориговані PSH для Харкова (панель на південний схід, кут нахилу  $65^\circ$ )

Таблиця 3.4 Скориговані PSH для Харкова

Місяць	PSH базова (год/день)	Зниження (%)	$\delta$	PSH скоригована (год/день)
Січень	1,2	15%	0,15	$1,2 \times 0,85 = 1,02$
Лютий	2,0	12%	0,12	$2,0 \times 0,88 = 1,76$
Березень	2,9	9%	0,09	$2,9 \times 0,91 = 2,64$
Квітень	4,0	6%	0,06	$4,0 \times 0,94 = 3,76$
Травень	5,0	4%	0,04	$5,0 \times 0,96 = 4,80$
Червень	5,5	3%	0,03	$5,5 \times 0,97 = 5,34$
Липень	5,4	3%	0,03	$5,4 \times 0,97 = 5,24$
Серпень	4,6	5%	0,05	$4,6 \times 0,95 = 4,37$
Вересень	3,5	8%	0,08	$3,5 \times 0,92 = 3,22$
Жовтень	2,5	11%	0,11	$2,5 \times 0,89 = 2,22$
Листопад	1,5	13%	0,13	$1,5 \times 0,87 = 1,31$
Грудень	1,0	15%	0,15	$1,0 \times 0,85 = 0,85$

На Рис. 3.3 показано графік залежності генерації енергії з урахуванням напрямку і кута нахилу панелей.

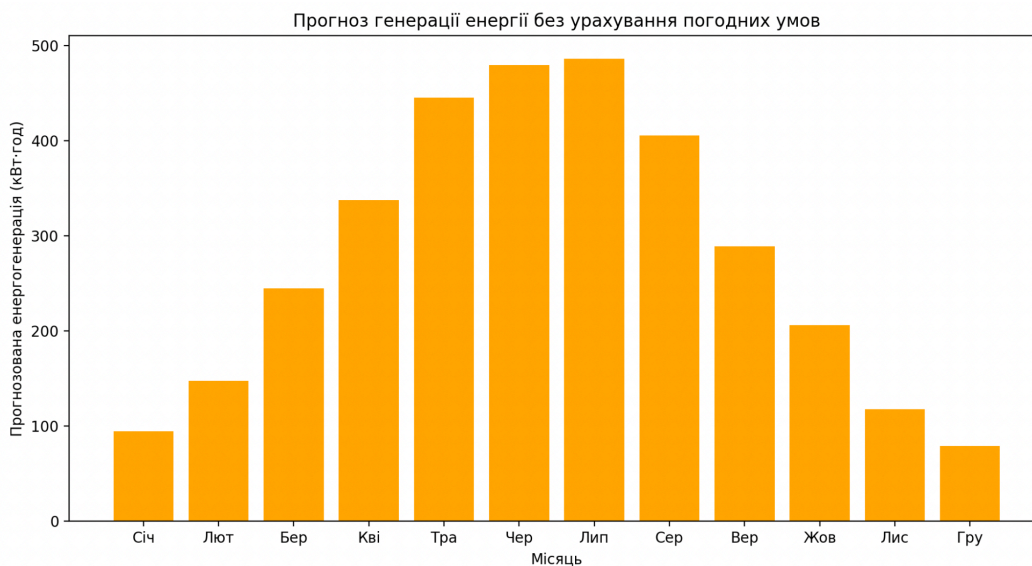


Рис. 3.3 Графік прогнозу генерації без врахування погодних умов

Коригування виробки енергії залежно від погодних умов

1. Сонячно:

- Коефіцієнт коригування:  $M=1,0$
- Опис: Ясний день без хмар. Сонячні панелі отримують максимальну кількість прямої сонячної радіації.
- Виробка: 100% від розрахованого максимального.

2. Змінна хмарність:

- Коефіцієнт коригування:  $M=0,6-0,8$
- Опис: Часткова хмарність; хмари періодично закривають сонце.
- Виробка: 60%–80% від максимального.

3. Хмарно:

- Коефіцієнт коригування:  $M=0,3-0,5$
- Опис: Повністю хмарне небо без прямого сонячного світла.
- Виробка: 30%–50% від максимального.

4. Дощ/Сніг (Густа хмарність):

- Коефіцієнт коригування:  $M=0,1-0,2$

- Опис: Густі хмари, опади у вигляді дощу або снігу.
- Виробка: 10%–20% від максимального.

На Рис. 3.4 показаний графік середньої кількості сонячних днів в залежності від місяця і графік залежності генерації енергії від місяця з урахуванням погодних умов.

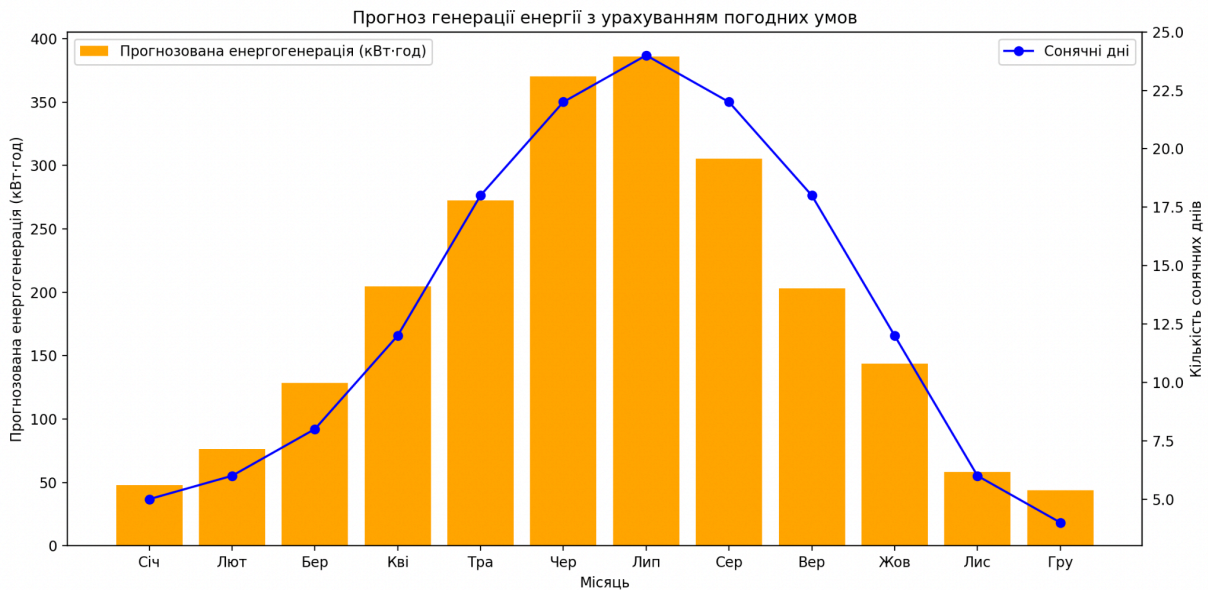


Рис. 3.4 Графік прогнозу генерації з урахуванням погодних умов

Урахування системних втрат.

Зазвичай у розрахунках враховуються системні втрати, які становлять приблизно **15%** (коефіцієнт ефективності системи  $\eta=0,85$ )

Таким чином, можливу добову генерацію ми можемо розрахувати за формулою:

$$E_{\text{добова}} = P_{\text{сумарна}} \times \text{PSH}_{\text{скоригована}} \times M \times \eta \quad (3.4.7)$$

де:

$E_{\text{добова}}$  — очікувана добова генерація електроенергії (Вт·год/день).

$P_{\text{сумарна}}$ — сумарна потужність встановлених сонячних панелей (Вт).

Для нашої системи будемо рахувати 6 панелей по 580 ватт, тобто

$$P_{\text{сумарна}} = 3450 \text{ Вт}$$

$PSH_{\text{скоригована}}$ — скориговані пікові сонячні години для даного місяця (год/день), в наближених розрахунках використаємо значення з таблиці 3.4.4 (в залежності від місяця).

$M$  — коефіцієнт коригування залежно від погодних умов. Його розрахуємо в залежності від даних прогнозу погоди.

$\eta$ — коефіцієнт ефективності системи після врахування втрат, візьмемо його 0,85.

Таким чином ми можемо приблизно порахувати сонячну генерацію на наступний день.

## РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ В ЖИТЛОВОМУ БУДИНКУ

За замовчанням інвертор налаштований таким чином, щоб заряджати акумулятори вночі (в час надлишкової генерації - 23:05 - 06:55) і використовувати протягом дня енергію з акумуляторів, не навантажуючи мережу, що видно на Рис. 4.1.

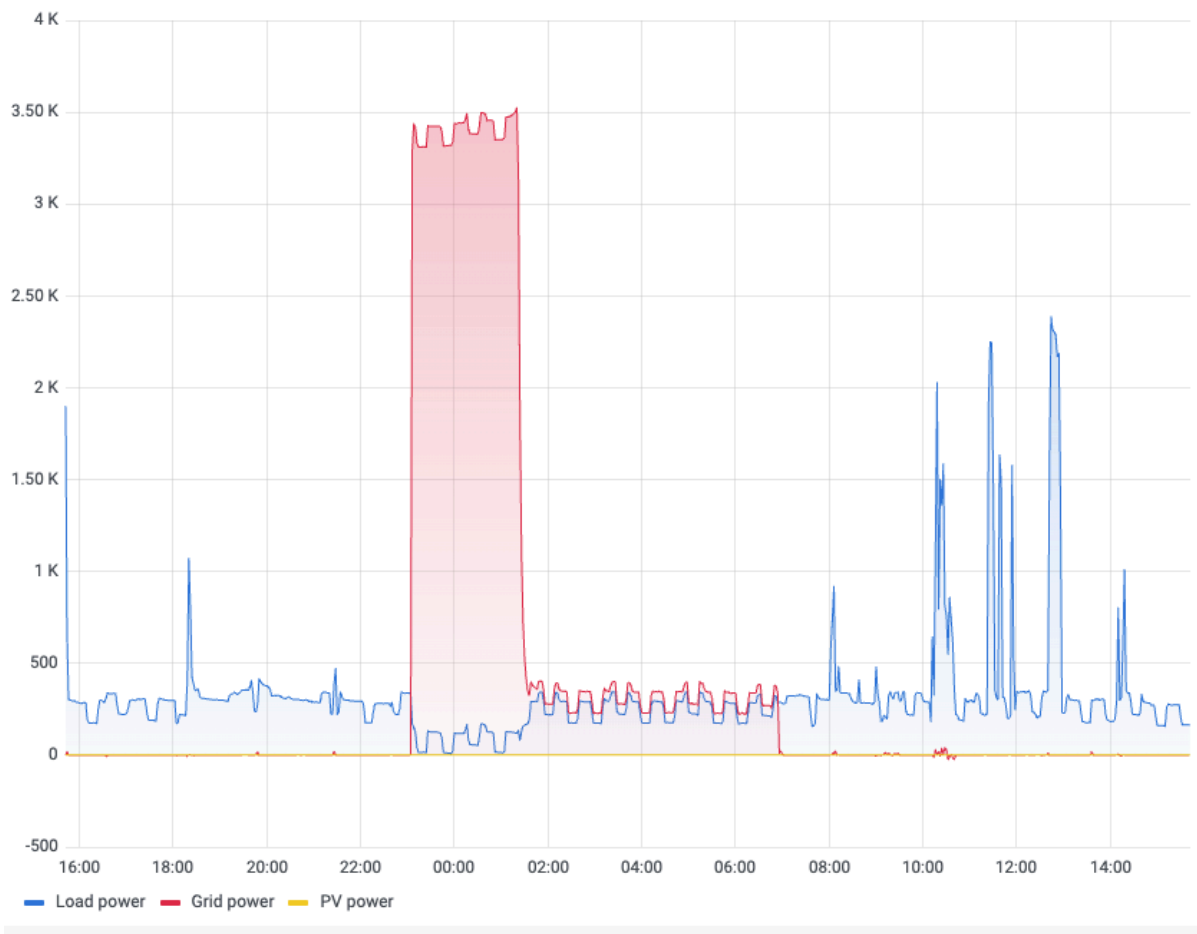


Рис. 4.1 Споживання електрики протягом доби.

Фактично акумулятор заряджається за 3-4 години, а далі підтримується зарядженим до 6:55, використовуючи енергію мережі для підключеного навантаження, як видно на графіку 4.1.

## 4.1 Оптимізація заряджання акумуляторів з урахуванням генерації

**Проблема 1.** Ми зарядили акумулятор вночі, але зранку почалася сонячна генерація у обсязі, що перевищує споживання підключеного навантаження. Оскільки акумулятор вже заряджено, то сонячна генерація не використовуватиметься, що не дуже добре.

**Рішення 1.** Запущений ввечері (о 23:00) скрипт порахує можливу сонячну генерацію по формулі 3.4.5. Знаючи реальну ємність акумулятора (7,2 кВт\*г, як було виміряно в 3.1.2), скрипт динамічно змінить параметр максимального зарядження акумулятора таким чином, щоб залишилася ємність для енергії сонячної генерації. Наприклад, якщо ємність акумулятора 7,2 кВт\*г, а можлива генерація 2 кВт\*г, т акумулятор буде заряджено до 70%.

### Реалізація рішення для Home Assistant

1. Введемо сенсор *solar\_m\_coefficient* для розрахунку коефіцієнту M (Лістинг 4.1)

*sensor:*

- *platform: template*

*sensors:*

*solar\_m\_coefficient:*

*friendly\_name: "Коефіцієнт M для сонячної генерації"*

*value\_template: >*

```
{% set forecast = state_attr('weather.forecast_home', 'forecast') %}
```

```
{% if forecast %}
```

```
  {% set next_day = forecast[0] %}
```

```
  {% set condition = next_day.condition %}
```

```
  {% if condition in ['sunny', 'clear-night'] %}
```

```
    1.0
```

```
  {% elif condition == 'partlycloudy' %}
```

```
    0.7
```

```
  {% elif condition == 'cloudy' %}
```

```

0.4
{% elif condition in ['rainy', 'pouring', 'snowy', 'hail', 'lightning'] %}
0.2
{% else %}
0.5 # Значення за замовчуванням
{% endif %}
{% else %}
0.5 # Значення за замовчуванням, якщо прогноз недоступний
{% endif %}

```

#### Лістинг 4.1 Програма розрахунку коеф. М

2. Введемо новий сенсор, *expected\_solar\_generation*, який буде розраховувати і повертати прогнозовану сонячну генерацію, використовуючи значення попереднього сенсору (в тому ж розділі sensors). Програма на Лістингу 4.2.

```

expected_solar_generation:
friendly_name: "Очікувана сонячна генерація"
unit_of_measurement: 'кВт·год'
value_template: >
{% set P_total = 6 * 580 %}
{% set eta = 0.86 %}
{% set M = states('sensor.solar_m_coefficient') | float(0.5) %}
{% set month = now().month %}
{% set psh_values = {
1: 1.02,
2: 1.76,
3: 2.64,
4: 3.76,
5: 4.80,
6: 5.34,
7: 5.24,
8: 4.37,
9: 3.22,
10: 2.22,
11: 1.31,
12: 0.85
} %}

```

```

{% set PSH = psh_values.get(month, 1.31) %}
{% set E_daily = (P_total * PSH * M * eta) / 1000 %}
{{ E_daily | round(2) }}

```

Лістинг 4.2 Програма підрахунку очікуваної сонячної генерації

3. Введемо новий сенсор *battery\_max\_charge\_level*, який розраховує, до якого заряду треба заряджати акумулятор, враховуючи прогнозовану генерацію. Програма на Лістингу 4.3

```

battery_max_charge_level:
  friendly_name: "Максимальний рівень заряду акумулятора"
  unit_of_measurement: "%"
  value_template: >
    {% set C_battery = 7.2 %}
    {% set E_expected = states('sensor.expected_solar_generation') |
float(0.0) %}
    {% set min_charge = 20 %}
    {% set max_charge = (1 - (E_expected / C_battery)) * 100 %}
    {% if max_charge < min_charge %}
      {% set max_charge = min_charge %}
    {% elif max_charge > 100 %}
      {% set max_charge = 100 %}
    {% endif %}
    {{ max_charge | round(0) }}

```

Лістинг 4.3 Програма підрахунку заряду акумулятору

4. Використовуючи сенсори, можна зробити автоматизацію, яка спрацьовує о 23й і встановлює максимальний State Of Charge для акумулятора. Програма на Лістингу 4.4.

```

automation:
  - alias: "Оновлення максимального рівня зарядки акумулятора"
    trigger:

```

```

- platform: time
  at: '23:00:00'
action:
- service: number.set_value
  data:
    entity_id:
      - number.deyeinvertermaster_timezone1_soc
      - number.deyeinvertermaster_timezone6_soc
    value: "{{ states('sensor.battery_max_charge_level') | int }}"

```

Лістинг 4.4 Програма, що задає порашований заряд акумулятора інвертору

Таким чином, використовуючи розрахунки з попередніх розділів, ми забезпечили “місце” в акумуляторі для розрахованої сонячної генерації. Результат роботи алгоритму видно на Рис. 4.2 і Рис. 4.3.




	Коефіцієнт M для сонячної генерації	0.7
	Очікувана сонячна генерація	2,74 кВт·год
	Максимальний рівень зарядки акумулятора	75%

Рис 4.2 Розраховані коефіцієнт, що залежить від погоди, очікувана сонячна генерація і порашований максимальний рівень заряду акумулятору



Рис 4.3 Встановлені в налаштування інвертору пораховані параметри

## 4.2 Керування навантаженням

**Рішення 2.** На випадок помилки в рішенні 1 (акумулятор заряджено на 100%, але сонячна генерація продовжується) ми можемо увімкнути бойлер і використати надлишкову енергію для підігріву води.

### Реалізація рішення для Home Assistant

В тестовій збірці використовується “розумний” бойлер, який можна увімкнути за допомогою Home Assistant і встановити температуру нагріву води. Якщо бойлер не такий “розумний”, то можна використати Wi-Fi розетку і фізично увімкнути або вимкнути пристрій. Програма на Лістингу 4.5.

*automation:*

- *alias: "Увімкнення бойлера при повному заряді акумулятора та продовженні сонячної генерації"*

*description: "Якщо акумулятор заряджено на 100% і є сонячна генерація, увімкнути бойлер та встановити температуру 70°C"*

*trigger:*

- *platform: state*

*entity\_id: sensor.deyeinvertermaster\_battery\_soc*

*condition:*

- *condition: numeric\_state*

*entity\_id: sensor.deyeinvertermaster\_battery\_soc*

*above: 99.9*

- *condition: numeric\_state*

*entity\_id: sensor.deyeinvertermaster\_pv1\_power*

*above: 100 # Порогове значення генерації, можна налаштувати*

*action:*

- *service: switch.turn\_on*

*target:*

*entity\_id: switch.viomi\_e1\_4088\_switch\_status*

- *service: water\_heater.set\_temperature*

*target:*

*entity\_id: water\_heater.viomi\_e1\_4088\_water\_heater*

*data:*

*temperature: 70*

*mode: single*

#### Лістинг 4.5 Програма вмикання додаткового навантаження

Також має сенс вимикати бойлер у випадку зниження генерації або заряду.

*automation:*

- *alias: "Вимкнення бойлера при зниженні сонячної генерації або рівня заряду"*

*description: "Вимикає бойлер, якщо акумулятор не заряджений на 100% або сонячна генерація знизилася"*

*trigger:*

- *platform: state*

*entity\_id:*

- *sensor.deyeinvertermaster\_battery\_soc*

```

- sensor.deyeinvertermaster_pv1_power
condition:
- condition: or
conditions:
- condition: numeric_state
  entity_id: sensor.deyeinvertermaster_battery_soc
  below: 99.5
- condition: numeric_state
  entity_id: sensor.deyeinvertermaster_pv1_power
  below: 80 # Порогове значення для вимкнення
action:
- service: switch.turn_off
target:
  entity_id: switch.viomi_e1_4088_switch_status
mode: single

```

Лістинг 4.6 Програма вимкнення додаткового навантаження

### 4.3 Додаткова підзарядка акумулятора у разі потреби

**Проблема 2.** Через велике споживання протягом дня та/або недостатню генерацію, заряду акумулятору не вистачило до кінця дня. У період пікового навантаження система була змушена переключитися на живлення від мережі, що є небажаним.

**Рішення.** Був написаний скрипт, який перевіряє о 15й залишковий заряд акумулятору, і, якщо він менший за 40%, перемикає інвертор в режим заряджання акумулятору і заряджає його до 60% влітку і до 50% в інші сезони.

### 4.4 Повідомлення про “небажані” події

**Небажані події.** Були реалізовані скрипти, які попереджають про “небажані” події через телеграм-бота:

- Продовження сонячної генерації, що перебільшує споживання, при повністю зарядженому акумуляторі,
- Споживання електрики з мережі під час пікових годин,
- Недостатній заряд акумулятора під час віялових відключень.

## ВИСНОВКИ

У процесі виконання роботи було розроблено програмно-апаратний комплекс для оптимізації енергоспоживання в житловому будинку, що дозволяє ефективно використовувати доступні ресурси, адаптуватися до змін енергетичних умов та забезпечувати енергонезалежність під час відключень електропостачання.

Досягнуті результати:

1. Створено технічне завдання;
2. Проведено огляд літератури та існуючих рішень за обраною тематикою дослідження;
3. Розроблено архітектуру програмно-апаратної частини системи керування енергоспоживанням розумного будинку;
4. Зібрано систему керування енергоспоживанням, підключено і інтегровано її в “розумний будинок”;
5. Зібрано дані споживання електроенергії та розраховано генерацію сонячних панелей;
6. Розроблено і реалізовано алгоритми керування системою енергоспоживання в “розумному будинку”;
7. Проведено тестування розробленої системи керування енергоспоживання.

Результати роботи підтвердили, що система дозволяє суттєво зменшити залежність від зовнішньої електромережі, забезпечує ефективну роботу в умовах змін енергетичного середовища та може бути інтегрована у більш широкі системи розумного будинку.

Перспективи для вдосконалення та подальших досліджень:

1. Використання зворотного зв'язку: Розробка алгоритмів самонавчання, що дозволить системі адаптуватися до зміни умов та вдосконалювати свої параметри в режимі реального часу.

2. Деталізація використання погодних прогнозів: Інтеграція з більш точними джерелами прогнозування погоди, що підвищить точність планування генерації та споживання енергії.
3. Масштабування проекту: Розширення системи для застосування в багатоквартирних будинках, офісних будівлях та інших типах споруд, включаючи комерційні об'єкти. При цьому треба врахувати індивідуальні звички до комфортної поведінки мешканців [16].
4. Інтеграція з іншими джерелами енергії: Використання додаткових генераторів, таких як вітряні турбіни, або розробка системи обміну енергією між домогосподарствами.
5. Розширення функціоналу моніторингу: Додавання більш детальних сенсорів і аналітичних інструментів для покращення управління енергоспоживанням.

Запропонована система відкриває широкі можливості для подальшого розвитку, що дозволить зробити її більш універсальною, адаптивною та ефективною для різних сценаріїв використання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Joubert S. *Home Assistant Solarman Integration*. GitHub-репозиторій. [https://github.com/StephanJoubert/home\\_assistant\\_solarman](https://github.com/StephanJoubert/home_assistant_solarman).
2. Rapañ D. *ha-solarman: Solarman Stick Logger Integration for Home Assistant*. GitHub-репозиторій. <https://github.com/davidrapan/ha-solarman>.
3. Офіційна документація Home Assistant. <https://www.home-assistant.io/docs/>.
4. Офіційна документація Solar Assistant. <https://solar-assistant.io/>.
5. Проект SmartDeyeDongle. <https://smarthomeintegrations.co.za/>
6. Syssi. *ESPHome SEPlOS BMS*. GitHub-репозиторій. <https://github.com/syssi/esphome-seplos-bms>.
7. Syssi. *ESPHome PACE BMS*. GitHub-репозиторій. <https://github.com/syssi/esphome-pace-bms>.
8. Проект Tertiush PACE BmsSpace. <https://github.com/Tertiush/bmspace>
9. Публікація Pace Controls. *PACE Modbus Protocol Guide*. <https://www.pacecontrols.com/wp-content/uploads/2016/06/PACE-Modbus-Protocol-Guide.pdf>.
10. Нараєвський С. "Порівняльний аналіз ефективності роботи сонячної та вітрової енергетики на світовому ринку." *Економіка та держава*, 2019, №5, с. 33-37. Дата доступу: [https://www.economy.in.ua/pdf/5\\_2019/9.pdf](https://www.economy.in.ua/pdf/5_2019/9.pdf).
11. Стрелкова Г.Г. "Виробництво електроенергії сонячними електростанціями: світові тенденції та перспективи для України." *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 2015, №2, с. 78-81. Дата доступу: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/15182/1/12.pdf>.
12. Сverdлюк Б. "Налаштування Home Assistant - Безпека та відеоспостереження." *oxorona.com*, 2023. <https://oxorona.com/ha-settings/>
13. "Розумний будинок — україномовні ресурси." *DOU*, 2022. <https://dou.ua/forums/topic/45311/>

14. "Як налаштувати та використовувати Home Assistant для живлення вашого розумного дому." *hitech.mediadoma.com*, 2022. <https://hitech.mediadoma.com/uk/jak-nalashtuvati-ta-vikoristovuvati-home-assistant-dlja-zhivlennja-vashogo-rozumnogo-domu/>
15. Гарячевська, І. В., Іванющенко, В. В., Протектор, Д. О. (2019). Система розрахунку окупності впровадження мережевих сонячних електростанцій в приватних домоволодіннях. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління», 42, 26-37. <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2019-42-03>
16. Simon Moeller, Is it a match? Smart home energy management technologies and user comfort practices in German multi-apartment buildings, *Energy Research & Social Science*, Volume 118, 2024, 103794, ISSN 2214-6296, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103794>
17. R. Kumar, P. Singh, "A Comprehensive Review on Ensemble Solar Power Forecasting Methods," *Springer Journal of Energy Systems*, 2023. <https://link.springer.com/article/10.1007/s42835-023-01378-2>
18. J. Makholm, "Capacity Value of Solar Power and Other Variable Generation," arXiv preprint, 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.09015>
19. Y. Zhao, M. Brown, "A Data-Efficient Approach to Behind-the-Meter Solar Generation Disaggregation," arXiv preprint, 2021. Доступно за посиланням. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.08122>