

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного
менеджменту

Ротаря Віталія Вадимовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.518.3:621.311.243
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розробка інформаційно-вимірювальної системи для управління установкою
акумуляування електроенергії потужністю до 3 кВт з використанням
фотовольтаїчної генерації

(назва роботи)

Інженерія відновлюваної енергетики

(назва освітньої програми)

152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і
текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня _____ В. В. Ротарь
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник _____ Райтер Петро Миколайович, д-р. техн. наук, професор
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

_____ В. С. Цих
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

Освітня програма Інженерія відновлюваної енергетики

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

інформаційно-вимірювальних

технологій та енергетичного

менеджменту

В. С. Цих

«___» _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Ротарю Віталію Вадимовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка інформаційно-вимірювальної системи для управління установкою акумулювання електроенергії потужністю до 3 кВт з використанням фотовольтаїчної генерації

керівник роботи Райтер Петро Миколайович, д-р. техн. наук, професор,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ІФНТУНГ від "05" травня 2026 року № 204/7

2. Строк подання студентом роботи "1" червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Проаналізувати побутові електричні навантаження житлового будинку та визначити їх пріоритетність для роботи в режимі автономного живлення.

2. Обґрунтувати структуру автономної фотоелектричної системи з акумуляторною установкою потужністю до 3 кВт.

3. Виконати підбір і розрахунок основного обладнання системи: інвертора, акумуляторної батареї LiFePO₄, фотоелектричних модулів та засобів захисту.

4. Розробити алгоритмічно-апаратну складову EMS-контролера: обрати мікроконтролерну платформу, інтерфейс зв'язку з інвертором та реалізувати програмне забезпечення для режимів «Економ» і «Блекаут».

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Нормоконтролер</i>	<i>доцент Яворський А. В.</i>		
<i>Перевірка на плагіат</i>	<i>доцент Миндюк В. Д.</i>		

7. Дата видачі завдання “5” травня 2026 р. _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача завдання (відповідно до наказу).	05.05.2026 р.	
2	Розроблення 1 розділу: «Аналіз побутових електричних навантажень і визначення їх пріоритетності».	05.05.2026 – 07.05.2026 р.	
3	Розроблення 2 розділу: «Обґрунтування структури та підбір основного обладнання автономної фотоелектричної системи з акумуляторною установкою до 3 кВт».	07.05.2026 – 19.05.2026 р.	
4	Розроблення 3 розділу: «Розробка алгоритму функціонування та програмного забезпечення EMS».	19.05.2026 – 31.05.2026 р.	
5	Оформлення роботи.	01.06.2026 – 10.06.2026 р.	

Студент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Ротарь В. В. «Розробка інформаційно-вимірювальної системи для управління установкою акумулювання електроенергії потужністю до 3 кВт з використанням фотовольтаїчної генерації». Дипломна робота освітнього рівня – бакалавр, на правах рукопису. Спеціальність – 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». – Івано-Франківськ, 2026.

Бакалаврська робота присвячена розробленню апаратного і програмного забезпечення контролера керування енергопотоками акумуляторної установки до 3 кВт для автономної фотоелектричної системи. У роботі розглянуто принципи побудови побутової автономної системи електроживлення з фотоелектричними модулями, акумуляторною батареєю LiFePO₄, мережею змінного струму та зовнішнім контролером керування режимами роботи. Вона складається зі вступу, трьох розділів, висновків, переліку використаних джерел і додатка. Загальний обсяг роботи – 84 сторінки, 29 рисунків, 5 таблиць. Кількість використаних джерел – 19.

У роботі виконано визначення пріоритетності побутових навантажень для живлення від акумуляторної установки, обґрунтовано структуру автономної системи з підключенням до існуючої мережі та фотоелектричної станції, побудовано алгоритми функціонування контролера в режимах «Економ» і «Блекаут». Проведено вибір основних технічних засобів системи: інвертора, акумуляторної батареї LiFePO₄, плати BMS, мікроконтролерної платформи керування, інтерфейсів зв'язку та захисних елементів. Розроблено підхід до програмної реалізації EMS-керування зовнішнім контролером із передаванням команд інвертору через послідовний інтерфейс. Також наведено підхід до вибору захисту акумуляторної частини, кабельних з'єднань і виконано оцінювання економічної ефективності запропонованого рішення.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання розроблених структурної схеми, алгоритмів роботи та програмних рішень під час створення побутової автономної системи резервного та економічного електроживлення з акумуляторною установкою до 3 кВт.

Ключові слова: АВТОНОМНА ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СИСТЕМА, АКУМУЛЯТОРНА УСТАНОВКА, КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОПОТОКАМИ, EMS-КОНТРОЛЕР, LiFePO_4 , BMS, ІНВЕРТОР, РЕЖИМ «ЕКОНОМ», РЕЖИМ «БЛЕКАУТ», STM32.

ABSTRACT

Rotar, V. V. “Development of an Information and Measurement System for Controlling an Electricity Storage System with a Capacity of Up to 3 kW Using Photovoltaic Generation.” Bachelor’s thesis, submitted as a manuscript. Specialization – 152 “Metrology and Information and Measurement Technology.” – Ivano-Frankivsk, 2026.

This bachelor’s thesis is devoted to the development of hardware and software for a controller that manages the power flows of a battery system with a capacity of up to 3 kW for an autonomous photovoltaic system. The thesis examines the principles of constructing a residential autonomous power supply system with photovoltaic modules, a LiFePO₄ battery, an AC grid, and an external operating mode controller. It consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of references, and an appendix. The total volume of the work is 84 pages, 29 figures, and 5 tables. The number of sources used is 19.

This paper determines the priority of household loads for power supply from a battery system, justifies the structure of an autonomous system connected to the existing grid and a photovoltaic power plant, and develops algorithms for the controller’s operation in “Economy” and “Blackout” modes. The main technical components of the system were selected: an inverter, a LiFePO₄ battery, a BMS board, a microcontroller-based control platform, communication interfaces, and protective elements. An approach was developed for the software implementation of EMS control via an external controller with command transmission to the inverter through a serial interface. An approach to selecting protection for the battery section and cable connections is also presented, and an assessment of the economic efficiency of the proposed solution has been performed.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of using the developed block diagram, operating algorithms, and software solutions when creating a household autonomous system for backup and economical power supply with a battery unit up to 3 kW.

Key words: AUTONOMOUS PHOTOELECTRIC SYSTEM, BATTERY STATION, POWER FLOW CONTROL, EMS CONTROLLER, LiFePO₄, BMS, INVERTER, “ECONOMY” MODE, “BLACKOUT” MODE, STM32.

ЗМІСТ

Перелік основних позначень і скорочень символів.....	10
Вступ.....	11
Розділ 1. Аналіз побутових електричних навантажень і визначення їх пріоритетності.....	13
1.1. Загальна характеристика побутових електричних навантажень об'єкта	13
1.2. Аналіз установленної потужності, пікового навантаження та енергоспоживання.....	15
1.3. Аналіз існуючих інформаційно-вимірювальних систем керування установками акумулювання електроенергії	18
1.4. Постановка задач дослідження	19
Розділ 2. Обґрунтування структури та підбір основного обладнання автономної фотоелектричної системи з акумуляторною установкою	20
2.1. Вибір інвертора автономної системи.....	20
2.2. Обґрунтування вибору типу акумуляторної батареї для автономної системи.....	22
2.3. Розрахунок параметрів акумуляторної установки та вибір конфігурації батарейного блоку	24
2.4. Підбір фотоелектричних модулів та параметрів фотоелектричного масиву	31
2.5. Вибір засобів захисту автономної системи.....	32
Розділ 3. Розробка алгоритму функціонування та програмного забезпечення EMS. Вибір платформи.....	40
3.1. Вибір мікроконтролерної платформи для реалізації EMS-контролера	40
3.2. Реалізація інтерфейсу зв'язку між EMS-контролером та інвертором.....	41
3.3. Розроблення алгоритму керування режимами «Економ» і «Блекаут» за допомогою EMS-контролера	42

3.4. Реалізація віддаленого керування пріоритетними навантаженнями на основі Wi-Fi розеток	47
3.5. Програмна реалізація основних функцій EMS-контролера	49
3.6. Оцінювання економічної ефективності технічного рішення	54
Висновки.....	59
Перелік використаних джерел.....	62
Додатки	64
Додаток А. Програмне забезпечення EMS-мікроконтролера «NUCLEO-H563ZI»	64

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ СИМВОЛІВ

- AC – Alternating Current (змінний струм)
- BMS – Battery Management System (система керування та захисту акумуляторної батареї)
- DC – Direct Current (постійний струм)
- DoD – Depth of Discharge (глибина розряду акумуляторної батареї)
- EMS – Energy Management System (система керування енергопотоками)
- GPIO – General Purpose Input/Output (універсальні входи/виходи мікроконтролера)
- LiFePO₄ – літій-залізо-фосфатний акумулятор
- MPPT – Maximum Power Point Tracking (відстеження точки максимальної потужності)
- PV – Photovoltaic (фотовольтаїчний, фотоелектричний)
- RS232 – послідовний інтерфейс передачі даних
- RS485 – диференційний послідовний інтерфейс передачі даних
- SOC – State of Charge (ступінь заряду акумуляторної батареї)
- STM32 – сімейство мікроконтролерів STMicroelectronics
- UART – Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (універсальний асинхронний приймач/передавач)
- USART – Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter, універсальний синхронно-асинхронний приймач-передавач
- АКБ – акумуляторна батарея
- ФЕМ – фотоелектричний модуль
- БМС – система керування та захисту акумуляторної батареї
- ККД – коефіцієнт корисної дії
- СЕС – сонячна електростанція
- ФЕС – фотоелектрична система

ВСТУП

Актуальність роботи

В умовах зростання вартості енергоресурсів та нестабільності централізованого електропостачання особливої актуальності набуває створення побутових автономних систем забезпечення електричною енергією, які здатні поєднувати енергоживлення від фотоелектричних модулів, акумуляторної батареї та зовнішньої мережі. Такі системи дають змогу не лише підвищити енергетичну автономність споживача, а й реалізувати раціональні алгоритми менеджменту енергії залежно від режиму роботи, стану акумуляторної батареї, наявності генерації від сонячної електростанції та добового тарифу на електроенергію.

Актуальність теми зумовлена також тим, що значна частина сучасних автономних інверторів із розширеним функціоналом EMS-керування є відносно дорогими. У зв'язку з цим практичний інтерес становить побудова системи, у якій основні функції керування енергопотоками реалізуються не самим інвертором, а зовнішнім контролером. Такий підхід дає можливість застосовувати доступніші силові перетворювачі електроенергії та одночасно забезпечувати необхідну гнучкість алгоритмів роботи системи.

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є розроблення апаратного і програмного забезпечення контролера керування енергопотоками акумуляторної установки потужністю до 3 кВт для автономної системи з підключенням до існуючої мережі та сонячної електростанції.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- оцінити обсяг побутових навантажень та визначити їх пріоритетність в режимах автономного живлення;
- визначити необхідні параметри акумуляторної установки на основі добового графіка споживання, потрібної тривалості резервування та вибраної конфігурації LiFePO₄ батареї;

- розробити алгоритми функціонування контролера для режимів «Економ» і «Блекаут» з урахуванням пріоритетів джерел живлення та стану акумуляторної батареї;
- розробити апаратну та програмну частини контролера на базі мікроконтролерної платформи з реалізацією передавання команд інвертору через послідовний інтерфейс;

Об’єктом дослідження є процес керування енергопотоками в автономній системі електроживлення з фотоелектричною генерацією, акумуляторною установкою та підключенням до зовнішньої мережі.

Предметом дослідження є апаратні засоби, програмні алгоритми та інформаційно-вимірювальні параметри зовнішнього контролера керування режимами роботи інвертора, акумуляторної батареї та навантаження у автономній системі.

Методи дослідження

Для розв’язання поставлених задач у роботі використано методи аналізу та синтезу інформації під час формування структури системи та вибору обладнання; розрахункові методи електротехніки для визначення параметрів навантаження, ємності акумуляторної батареї, струмів та вибору захисних елементів; метод структурно-функціонального проєктування під час розроблення схеми системи; метод алгоритмізації під час побудови режимів функціонування контролера; метод порівняльного аналізу під час оцінювання режимів «Економ» і «Блекаут».

Практичне значення одержаних результатів

Запропоновані рішення можуть бути використані під час створення побутових автономних систем резервного живлення, у яких необхідно забезпечити автоматичний вибір джерела енергії, заряджання акумуляторів у визначені часові інтервали, підтримання пріоритетних навантажень та економію коштів за рахунок раціонального режиму роботи.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПОБУТОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ І ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ПРІОРИТЕТНОСТІ

1.1. Загальна характеристика побутових електричних навантажень об'єкта

Об'єктом дослідження є забезпечення електроенергією житлового будинку із типовим набором побутових пристроїв електроспоживання, які відрізняються за встановленою потужністю, тривалістю роботи, режимом використання та важливістю для забезпечення нормальних умов проживання. В умовах можливих аварійних або графікових вимикань подачі електроенергії з електромережі особливої актуальності набуває не лише резервування живлення, а й правильний розподіл навантажень за ступенем їх пріоритетності.

В межах даної роботи запропоновано застосувати систему резервного електроживлення на базі інвертора потужністю 3 кВт, акумуляторної батареї та мікроконтролерного вузла керування. На відміну від традиційного підходу, де всі резервовані навантаження (споживачі електроенергії) розглядаються як одна група, у роботі використано поділ споживачів на три рівні пріоритетності.

До першого рівня пріоритетності віднесено споживачів, які є критично важливими під час відключення зовнішнього електропостачання. До цієї групи належать газовий котел системи опалення та гарячого водопостачання, холодильник, мережевий роутер та енергоощадне освітлення. Саме ці споживачі забезпечують мінімально необхідні умови проживання: підтримання теплопостачання, збереження продуктів, доступ до зв'язку та базове освітлення приміщень. Тому живлення споживачів першого рівня повинно зберігатися найдовше.

До другого рівня пріоритетності віднесено навантаження, які є корисними та бажаними в побуті, однак не є критично необхідними в умовах тривалого знеструмлення. До них належать комп'ютер, мікрохвильова піч, зарядні пристрої та телевізор. У нормальному режимі резервного живлення ці споживачі можуть працювати разом із навантаженнями першого рівня. Однак при зменшенні рівня

заряду акумуляторної батареї вони мають бути автоматично відключені для збереження енергії на живлення найбільш важливих споживачів.

До третього рівня пріоритетності віднесено потужні та некритичні побутові прилади: фен, пиломок, електричну праску та пральну машину. Такі споживачі характеризуються значною потужністю та можуть істотно перевантажувати автономну систему живлення. Саме тому в межах даної роботи передбачено, що навантаження третього рівня не будуть заживлюватися від інвертора взагалі і зможуть працювати лише за наявності електроенергії, що постачається із зовнішньої електричної мережі.

Необхідність запровадження саме трирівневої системи пріоритетів пояснюється обмеженням потужності інвертора та прагненням підвищити ефективність використання накопиченої в акумуляторах енергії.

Для реалізації такого підходу передбачається використання керованих Wi-Fi розеток, підключених до домашньої бездротової мережі. Мікроконтролер, отримуючи інформацію про рівень заряду акумуляторної батареї, формує команду на відключення споживачів другого рівня пріоритетності. Таким чином, у початковий період автономної роботи система забезпечує живлення споживачів першого та другого рівнів, а після досягнення граничного рівня заряду 40% автоматично відключає другий рівень споживачів, залишаючи в роботі лише перший рівень. Вибір порогового значення 40% зумовлений необхідністю зберегти резерв енергії для споживачів першого рівня. Оскільки нижня допустима межа розряду акумуляторної батареї прийнята на рівні 20%, то діапазон від 40% до 20% залишається для живлення критичних навантажень.

Запропонований алгоритм дозволяє врахувати реальні особливості експлуатації побутової системи резервного живлення. На практиці відключення електроенергії часто мають прогнозовану тривалість, наприклад 4 години, однак фактичне відновлення електропостачання може затримуватися від 15 хвилин до 2 годин. Саме для покриття такого додаткового інтервалу доцільно зберігати частину заряду акумуляторної батареї лише для споживачів першого рівня пріоритетності.

1.2. Аналіз установленої потужності, пікового навантаження та енергоспоживання

Для оцінювання можливості живлення побутових споживачів від автономної системи було виконано аналіз установленої потужності, розрахункового пікового навантаження та споживання електричної енергії за чотиригодинний період роботи.

Таблиця 1.1 – Розрахунок споживання електроенергії пристроями житлового будинку

Споживач	Потужність, Вт	К-сть	Загальна потужність, Вт	Робота за 4 години, год	Споживання енергії за 4 години, кВт·год	Пікова потужність, кВт
Газовий котел	80	1	80	4	0,32	0,125
Холодильник	110	1	110	4	0,44	0,6
Мережевий роутер	9	1	9	4	0,036	0,015
Енергозберігаюча лампа	20	15	300	4	1,2	0,3
Комп'ютер	250	1	250	4	1	0,25
Мікрохвильова піч	700	1	700	0,0833	0,05831	0,7
Зарядні пристрої	15	3	45	2	0,09	0,045
Телевізор	25	1	25	2	0,05	0,035
Фен	1200	1	1200	0,25	0,3	1,2
Пилосмок	2000	1	2000	0,25	0,5	2
Електрична праска	1500	1	1500	0,25	0,375	1,5
Пральна машина	1800	1	1800	1	1,8	2,1

Сумарна встановлена потужність усіх розглянутих споживачів становить 8019 Вт. Із цієї величини на споживачів першого рівня припадає 499 Вт, на споживачів другого рівня – 1020 Вт, а на споживачів третього рівня – 6500 Вт. Отже, вже на рівні встановленої потужності видно, що основну частку навантаження формують саме споживачі третього рівня, використання яких у режимі резервного живлення є недоцільним.

Більш показовим для вибору параметрів інвертора є аналіз пікового навантаження. На основі даних таблиці 1.1 та поділу споживачів за рівнями пріоритетності визначено, що сумарна пікова потужність споживачів першого рівня становить 1,04 кВт, споживачів другого рівня – 1,03 кВт, а споживачів

третього рівня – 6,8 кВт. Загальна пікова потужність усіх трьох рівнів дорівнює 8,87 кВт, що майже втричі перевищує номінальну потужність обраного інвертора 3 кВт. За вказаних умов одночасне живлення всіх побутових споживачів від інвертора є технічно неможливим. Натомість сумарна пікова потужність споживачів першого та другого рівнів становить 2,07 кВт, що вже відповідає можливостям інвертора та створює певний запас по потужності.

Частина побутових споживачів має індуктивний або нелінійний характер навантаження, тому для перевірки завантаження інвертора доцільно врахувати коефіцієнт потужності окремих електроприймачів. У межах даного розрахунку реактивну складову враховано для газового котла, холодильника, мікрохвильової печі та комп'ютера. Це пояснюється тим, що газовий котел містить електропривід циркуляційної помпи подачі теплоносія, вентилятор системи відведення димових газів, виконавчі електроклапани та електронні вузли керування, холодильник містить електродвигун компресора, мікрохвильова піч містить перетворювальні та електромеханічні елементи, а комп'ютер працює через імпульсний блок живлення.

Оскільки паспортні значення коефіцієнта потужності для конкретних побутових приладів відсутні, у роботі прийнято типові розрахункові значення $\cos\varphi$ для відповідних груп електроприймачів. Для газового котла, який містить циркуляційну помпу, вентилятор та електронні вузли керування, прийнято $\cos\varphi = 0,75$. Таке значення відповідає характеру малопотужного електродвигунного навантаження, для якого коефіцієнт потужності залежить від ступеня завантаження. Для холодильника з компресорним електродвигуном прийнято $\cos\varphi = 0,70$, що відповідає типовому діапазону для холодильних компресорів і близьке до середніх значень, наведених для побутових холодильників. Для мікрохвильової печі як побутового нелінійного навантаження з перетворювальними та електромеханічними елементами прийнято $\cos\varphi = 0,85$. Для комп'ютера з імпульсним блоком живлення прийнято $\cos\varphi = 0,90$, оскільки для таких пристроїв коефіцієнт потужності залежить від наявності та типу коректора коефіцієнта потужності. Прийняті значення використовуються не як паспортні характеристики конкретних моделей, а як типові розрахункові коефіцієнти для уточнення навантаження на інвертор та акумуляторну батарею. Для інших споживачів вплив

реактивної складової в межах даного розрахунку прийнято незначним, тому реактивна складова споживаної потужності не враховувалась.

З урахуванням прийнятих коефіцієнтів потужності уточнена повна пікова потужність споживачів першого та другого рівнів становить приблизно 2,52 кВА. Це значення не перевищує номінальної потужності обраного інвертора 3 кВт, тому навіть з урахуванням неідеального коефіцієнта потужності окремих побутових приладів інвертор має достатній запас для живлення вибраних пріоритетних навантажень.

За чотиригодинний період автономної роботи споживачі першого рівня споживають 1,996 кВт·год електроенергії, а споживачі першого та другого рівнів разом – 3,194 кВт·год. Якщо ж враховувати всі три рівні споживачів, то сумарне споживання за 4 години становитиме близько 6,169 кВт·год. Таким чином, підключення споживачів третього рівня не лише перевищує допустиму потужність інвертора, а й майже вдвічі збільшує потребу в електроенергії.

Отримані результати підтверджують доцільність поділу навантажень на пріоритетні групи. У нормальному режимі резервного живлення доцільно забезпечувати роботу споживачів першого та другого рівнів, оскільки їх сумарне пікове навантаження не перевищує можливостей інвертора. Після зниження рівня заряду акумуляторної батареї до 40% споживачі другого рівня мають бути автоматично відключені. Це дозволить використовувати залишок заряду в діапазоні від 40% до 20% лише для найважливіших навантажень першого рівня. Такий підхід формує енергетичний резерв на випадок затримки відновлення зовнішнього електропостачання.

Отже, проведений аналіз показує, що застосування трирівневої системи пріоритетності побутових електричних навантажень є обґрунтованим як з технічної, так і з експлуатаційної точки зору. Такий підхід дозволяє узгодити склад резервованих споживачів із потужністю інвертора, зменшити ризик перевантаження автономної системи та раціонально використовувати запас електричної енергії акумуляторної батареї.

1.3. Аналіз існуючих інформаційно-вимірювальних систем керування установками акумулювання електроенергії

У сучасних побутових системах накопичення електроенергії можна виділити кілька основних підходів до побудови інформаційно-вимірювальних систем керування.

Перший підхід полягає у використанні вбудованих функцій керування, які вже реалізовані у гібридному інверторі. У такому випадку інвертор є не лише силовим перетворювачем, але й центральним елементом керування системою. Він отримує інформацію про стан акумуляторної батареї, параметри фотоелектричних модулів, наявність зовнішньої мережі та поточне навантаження. На основі цих даних інвертор самостійно визначає, яке джерело енергії потрібно використовувати в певний момент часу: сонячні панелі, акумуляторну батарею або зовнішню мережу.

Перевагою такого підходу є висока інтегрованість обладнання. Користувач отримує готове рішення, у якому більшість функцій керування вже передбачена виробником. Такі системи зазвичай мають мобільний застосунок або вебінтерфейс для моніторингу, можуть працювати з сумісними акумуляторними батареями та підтримують базові режими керування зарядом і розрядом. Однак недоліком такого підходу є висока вартість обладнання, залежність від логіки, закладеної виробником, а також обмежені можливості для реалізації власних алгоритмів керування. Наприклад, якщо потрібно реалізувати окрему логіку пріоритетності побутових навантажень або змінювати режими роботи залежно від користувацьких умов, можливості стандартного інвертора можуть бути недостатніми.

Другий підхід передбачає використання зовнішнього EMS-контролера. У цьому випадку інвертор виконує роль силового вузла, BMS відповідає за безпеку акумуляторної батареї, а окремий контролер реалізує логіку верхнього рівня. Такий контролер може отримувати дані від інвертора через комунікаційний інтерфейс, аналізувати рівень заряду батареї, стан мережі, час доби, наявність генерації від фотоелектричних модулів і на основі цього формувати команди для інвертора або додаткових виконавчих пристроїв.

Перевагою такого підходу є гнучкість. Зовнішній контролер дозволяє реалізувати власні алгоритми роботи системи, які не завжди доступні у стандартних налаштуваннях інвертора.

1.4. Постановка задач дослідження

На основі аналізу побутових електричних навантажень, визначення їх пріоритетності та розгляду існуючих підходів до побудови інформаційно-вимірjuвальних систем керування установками акумулювання електроенергії сформульовано основні задачі подальшого дослідження:

1. Обґрунтувати структуру та виконати підбір основного обладнання автономної фотоелектричної системи з акумуляторною установкою до 3 кВт;
2. Розробити алгоритм функціонування та програмне забезпечення EMS, а також вибрати мікроконтролерну платформу для його реалізації;
3. Виконати оцінку економічної ефективності запропонованого технічного рішення.

РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ПІДБІР ОСНОВНОГО ОБЛАДНАННЯ АВТОНОМНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ З АКУМУЛЯТОРНОЮ УСТАНОВКОЮ

2.1 Вибір інвертора автономної системи

Для цієї роботи інвертор повинен відповідати кільком основним вимогам. Від вибору інвертора залежать конфігурація всієї системи, напруга акумуляторного блока, допустимі параметри фотоелектричного масиву, режими живлення навантаження. Він повинен підтримувати роботу з фотоелектричними модулями через вбудований MPPT-контролер. Інвертор має працювати спільно з акумуляторною батареєю та мережею, щоб забезпечити як економічний режим роботи, так і резервне живлення при зникненні мережі.

З урахуванням зазначених вимог для проєктованої системи обрано інвертор «Q-Power Axpert VM III 3000-24».



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд інвертора «Q-Power Axpert VM III 3000-24»[4]

Даний інвертор належить до класу побутових однофазних інверторів і має номінальну потужність 3000 Вт. Він розрахований на роботу з акумуляторною батареєю напругою 24 В, формує вихідну напругу 230 В змінного струму та забезпечує живлення навантаження синусоїдальною напругою. Коефіцієнт корисної дії інвертора становить 90%, а короткочасна перевантажувальна здатність досягає подвійної номінальної потужності протягом 5 секунд.[4]

Таблиця 2.1 – Характеристики інвертора «Q-Power Axpert VM III 3000-24»[4]

Модель	
Номінальна потужність	3000 Вт
Ввід	
Напруга	230 В
Діапазон напруги	170–280 В
Діапазон частот	50 Hz / 60 Hz
Акумулятор	
Напруга акумулятора	24 В
Напруга плаваючого заряду	27 В
PV вхід	
MPPT	1
Максимальна вхідна потужність PV	4000 Вт
Діапазон напруги MPPT	120 В–450 В
Максимальна вхідна напруга PV	500 В
Інше	
ККД	90%
Інтерфейс зв'язку	USB/RS232/RS485/ Bluetooth

Інвертор розглядається не як засіб одночасного живлення всього електричного господарства будинку, а для живлення конкретних обраних побутових навантажень.

Одна з важливих причин вибору даного інвертора є можливість реалізації керування з боку зовнішнього контролера. У такій структурі інвертор виступає силовим виконавчим вузлом, а зовнішній контролер формує та передає команди, пов'язані з вибором джерела енергії, пріоритетами навантаження, режимами заряджання акумуляторної батареї та обмеженнями за рівнем заряду. Такий підхід добре узгоджується з ієрархічною структурою керування енергетичною системою, де верхній рівень визначає режим роботи, а нижчі рівні реалізують ці команди у вигляді конкретних дій силових перетворювачів [1].

Для послідовного зв'язку між двома зовнішніми пристроями традиційно використовується інтерфейс RS232, який забезпечує двобічну передачу даних окремими лініями приймання і передавання. [2]

Наявність комунікаційних можливостей у складі інвертора робить доцільною реалізацію зовнішнього EMS-контролера на базі мікроконтролерної платформи. У

цьому випадку контролер не замінює інвертор, а визначає логіку роботи системи вищого рівня: коли слід використовувати акумулятор, за яких умов необхідно переходити на живлення від мережі, коли допустимо заряджати батарею від мережі, а також які навантаження можуть залишатися підключеними в умовах обмеженого енергетичного ресурсу. Такий розподіл функцій відповідає сучасному підходу до побудови побутових автономних мікромереж, де алгоритм керування повинен забезпечувати стабільну роботу як у мережевому, так і в автономному режимі.[3]

2.2 Обґрунтування вибору типу акумуляторної батареї для автономної системи

Для системи, що працює спільно з фотомодулями, інвертором і зовнішнім контролером керування енергопотоками, тип акумулятора безпосередньо впливає на енергоефективність, допустиму глибину розряду, ресурс циклічної роботи, безпечність експлуатації та загальну економічну доцільність рішення. У системах з фотоелектричною генерацією накопичення енергії фактично є необхідною умовою для стабільного та безперервного використання сонячної енергії, оскільки процеси генерації та споживання в часі, як правило, не збігаються.[1]

Для побутових і малопотужних автономних систем можуть застосовуватися свинцево-кислотні, літій-іонні, натрій-сірчані та проточні акумулятори. Проте не всі з них однаково придатні для використання в умовах житлового будинку. Для фотоелектричних систем найпоширенішим варіантом накопичення залишаються електрохімічні батареї, оскільки саме вони найкраще поєднують прийнятні габарити, можливість встановлення в локальній системі та швидкодію в режимах заряду і розряду.[1]

Традиційно в автономних і резервних системах широко застосовувалися свинцево-кислотні акумулятори. Їх перевагами є відносно невисока початкова вартість, відпрацьована технологія та багаторічний досвід використання разом із сонячними контролерами та інверторами. Водночас для сучасної автономної системи такі батареї мають низку суттєвих недоліків. Для них характерна потреба в технічному обслуговуванні, зокрема пов'язаному з електролітом, а також нижчі

показники довговічності та енергетичної ефективності порівняно з літійовими системами. [1]

Під час заряду в таких батареях відбувається виділення водню та кисню, що ускладнює експлуатацію і висуває додаткові вимоги до обслуговування. [5]

У зв'язку з цим для сучасних систем накопичення дедалі більшого поширення набувають літій-іонні акумулятори. Їх застосування є особливо доцільним у системах, де потрібні висока питома енергія, мала маса, тривалий ресурс та можливість щоденної циклічної роботи. Літій-іонні батареї широко використовуються в системах накопичення енергії для енергетичних задач, оскільки придатні як для підтримання якості електроенергії, так і для задач енергоменеджменту та інтеграції нестабільної генерації від відновлюваних джерел.[5]

Серед літій-іонних технологій для даної роботи найбільш доцільним є вибір літій-залізо-фосфатної акумуляторної батареї LiFePO_4 . Це пов'язано з тим, що LiFePO_4 поєднує підвищену безпечність, добрий циклічний ресурс, стабільну напругу під час розряду та придатність до стаціонарної роботи в складі побутової енергетичної системи. Для LiFePO_4 номінальна напруга комірки близько 3,2 В, а також збереження понад 80% ємності після 2000 циклів при 100% глибині розряду і температурному діапазоні використання 18-32 °С. Також для цього типу акумуляторів характерні висока безпечність і стабільна напруга в процесі розряду. Основними недоліками є низькі температурні характеристики та зниження ємності розряду до 70-80% при 0°C. [3]

Для побутової автономної системи особливо важливими є також енергоефективність, відсутність складного обслуговування та стабільність роботи в широкому діапазоні навантажень. Для літій-залізо-фосфатних систем характерні висока енергетична ефективність, малий саморозряд, відсутність потреби у постійному підзаряді для підтримання рівня заряду, а також триваліший строк служби порівняно зі свинцево-кислотними батареями. Такі системи практично не потребують технічного обслуговування, мають високу щільність енергії та забезпечують менші втрати енергії в процесі експлуатації.[2]

Отже, для проєктованої автономної фотоелектричної системи доцільно застосувати акумуляторну батарею типу LiFePO_4 . Такий вибір обґрунтовується

високою безпечністю, добрим циклічним ресурсом, стабільною напругою під навантаженням, високою енергоефективністю, низьким саморозрядом та відсутністю потреби у регулярному технічному обслуговуванні. У порівнянні з свинцево-кислотними акумуляторами LiFePO_4 краще відповідає вимогам сучасної побутової автономної системи з фотоелектричними модулями, акумуляторним накопиченням.

2.3 Розрахунок параметрів акумуляторної установки та вибір конфігурації батарейного блоку

Оскільки обраний інвертор працює з акумуляторами 24 В, конфігурація батарейного блоку має бути узгоджена саме з цим класом напруги. При цьому акумуляторна установка повинна задовольняти дві основні вимоги: забезпечувати необхідний запас енергії на заданий час автономної роботи та витримувати струмове навантаження, яке виникає під час роботи інвертора.

У першому розділі було встановлено, що сумарне активне споживання електричної енергії споживачами першого та другого рівнів пріоритетності за розрахунковий інтервал 4 години становить 3,194 кВт·год. Це значення характеризує енергію, яка безпосередньо споживається навантаженнями, однак під час вибору акумуляторної батареї необхідно врахувати, що частина побутових електроприймачів має індуктивний або нелінійний характер навантаження.

Зменшення коефіцієнта потужності призводить до збільшення діючого значення струму на виході інвертора. Відповідно, інвертор повинен споживати більший струм з акумуляторної батареї для забезпечення роботи таких навантажень. Тому для споживачів, у яких реактивна складова є найбільш суттєвою, у розрахунку прийнято уточнену енергетичну потребу з урахуванням коефіцієнта потужності.

Уточнена енергетична потреба окремого споживача визначається за формулою:

$$W_{\text{розр}} = \frac{(P \cdot t)}{\cos\varphi}, \quad (2.1)$$

де $W_{розр}$ – розрахункова енергетична потреба споживача з урахуванням коефіцієнта потужності, кВт·год;

P – активна потужність споживача, кВт;

t – тривалість роботи споживача, год;

$\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності.

У межах даного розрахунку коефіцієнт потужності враховано для газового котла, холодильника, мікрохвильової печі та комп'ютера. Для газового котла прийнято $\cos\varphi = 0,75$, для холодильника $\cos\varphi = 0,70$, для мікрохвильової печі $\cos\varphi = 0,85$, для комп'ютера $\cos\varphi = 0,90$. Для інших побутових споживачів вплив реактивної складової в межах даного розрахунку прийнято незначним.

Для газового котла:

$$W_{котел} = \frac{(0,08 \cdot 4)}{0,75} = 0,427 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Для холодильника:

$$W_{хол} = \frac{(0,11 \cdot 4)}{0,70} = 0,629 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Для мікрохвильової печі:

$$W_{мікр} = \frac{(0,7 \cdot 0,0833)}{0,85} = 0,069 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Для комп'ютера:

$$W_{комп} = \frac{(0,25 \cdot 4)}{0,9} = 1,111 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

У початковому розрахунку активне споживання цих чотирьох приладів становило:

$$W_{поч} = 0,32 + 0,44 + 0,058 + 1,00 = 1,818 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Після врахування коефіцієнта потужності їх розрахункова енергетична потреба становить:

$$W_{ут.пр} = 0,427 + 0,629 + 0,069 + 1,111 = 2,236 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Тоді уточнене значення енергії, необхідної для живлення споживачів першого та другого рівнів протягом 4 годин, дорівнює:

$$3,194 - 1,818 + 2,236 = 3,612 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Отже, для подальшого розрахунку акумуляторної установки приймається значення $W_{\text{роз}} = 3,61 \text{ кВт} \cdot \text{год}$

Оскільки навантаження отримує енергію через інвертор, потрібний запас енергії акумуляторної батареї повинен враховувати втрати на перетворення. Для обраного інвертора у подальших розрахунках приймається коефіцієнт корисної дії $\eta_{\text{інв}} = 0,9$

Тоді енергія, яку повинна віддати батарея на стороні постійного струму, визначається за формулою:

$$W_{\text{бат}} = \frac{W_{\text{роз}}}{\eta_{\text{інв}}}, \quad (2.2)$$

Підставляючи числові значення, отримаємо:

$$W_{\text{бат}} = \frac{3,61}{0,9} = 4,01 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Отже, для живлення споживачів першого та другого рівнів протягом 4 годин батарея повинна віддати приблизно 4,01 кВт·год енергії на стороні постійного струму.

Разом із тим під час вибору номінальної ємності батареї слід враховувати, що для LiFePO₄-акумуляторів небажано постійно використовувати повну номінальну ємність. Практично доцільно закладати роботу з корисною глибиною розряду близько 80%, що забезпечує компроміс між доступною енергією та довговічністю батареї. Тоді потрібна номінальна енергоємність акумуляторного блока становитиме:

$$W_{\text{ном}} = \frac{W_{\text{бат}}}{\text{DoD}}, \quad (2.3)$$

де $\text{DoD} = 0,8$.

$$W_{\text{ном}} = \frac{4,01}{0,8} = 5,01 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Таким чином, номінальна енергоємність батарейного блока повинна бути не меншою ніж 5,01 кВт·год.

Наступним етапом є визначення конфігурації батареї за напругою. Для літій-залізо-фосфатної комірки номінальна напруга становить 3,2 В. Тому для системи класу 24 В кількість послідовно з'єднаних комірок визначається як:

$$n_k = \frac{U_{\text{сис}}}{U_k}, \quad (2.4)$$

де $U_{\text{сис}}$ – напруга системи класу 24 В;

U_k – номінальна напруга однієї комірки.

$$n_k = \frac{24}{3,2} = 7,5$$

Оскільки кількість комірок має бути цілим числом, приймається конфігурація 8 комірок, з'єднаних послідовно. У такому випадку номінальна напруга батарейного блока становитиме:

$$U_{\text{ном}} = 8 \cdot 3,2 = 25,6 \text{ В}$$

Мінімальна потрібна ємність батарейного блока в ампер-годинах визначається за формулою:

$$C_{\text{мін}} = \frac{W_{\text{ном}} \cdot 1000}{U_{\text{ном}}}, \quad (2.5)$$

$$C_{\text{мін}} = \frac{5,01 \cdot 1000}{25,6} = 195,7 \text{ А} \cdot \text{год}$$

Отже, мінімальна ємність батарейного блока з урахуванням неідеального коефіцієнта потужності окремих побутових споживачів повинна бути не меншою за 196 А·год. Конфігурація на 200 А·год є мінімально допустимою для забезпечення основного чотиригодинного періоду автономної роботи, однак для створення додаткового резерву доцільно використати комірки більшої ємності.

Для реалізації акумуляторної установки прийнято рішення використовувати комірки моделі EVE LF230 номінальною напругою 3,2 В та ємністю 230 А·год у кількості 8 шт.[7]



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд комірки типу LiFePO4 «EVE 3.2V/230Ah»[7]

Оскільки ця модель має ємність 230 А·год, корисний запас енергії акумуляторного блока становитиме:

$$W_{\text{АКБ}} = 25,6 \cdot 230 \cdot 0,8 \cdot 0,9 = 4\,239 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 4,239 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Отримане значення 4,239 кВт·год характеризує корисний запас електричної енергії, який може бути використаний для живлення навантаження на стороні змінного струму з урахуванням допустимої глибини розряду акумуляторної батареї та коефіцієнта корисної дії інвертора.

Уточнена потреба споживачів першого та другого рівнів за розрахунковий інтервал 4 години становить 3,61 кВт·год. Тоді залишок корисної енергії після завершення цього інтервалу дорівнюватиме:

$$W_{\text{зал}} = 4,239 - 3,61 = 0,629 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Отже, після 4 годин роботи споживачів першого та другого рівнів в акумуляторному блоці ще залишається приблизно 0,63 кВт·год корисної енергії.

Далі необхідно оцінити, чи достатньо цього запасу для додаткового живлення споживачів першого рівня у разі затримки відновлення зовнішнього електропостачання. Після відключення споживачів другого рівня в роботі залишаються газовий котел, холодильник, мережевий роутер та освітлення. Для газового котла і холодильника враховується коефіцієнт потужності, оскільки ці споживачі мають індуктивну складову навантаження.

Розрахункова потреба споживачів першого рівня за 1 годину становитиме:

$$W_{\text{спожив}} = 0,107 + 0,157 + 0,009 + 0,300 = 0,573 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Порівняння отриманих значень показує, що залишок корисної енергії після 4 годин роботи навантажень першого та другого рівнів є достатнім для подальшого живлення лише споживачів першого рівня протягом щонайменше 1 години:

$$0,629 > 0,573$$

Таким чином, обрана акумуляторна батарея забезпечує основний чотиригодинний період роботи споживачів першого та другого рівнів, а також додатковий резерв приблизно на 1 годину для живлення найбільш важливих споживачів першого рівня.

Для контролю та захисту батарейного блока обрано BMS JKBMS B1A8S20PR. Ця плата підтримує роботу з батареями LiFePO4 у конфігурації 4S–8S, має активне балансування зі струмом 1 А, номінальний струм заряду 200 А, номінальний струм розряду 200 А та піковий струм розряду 350 А. Також плата має вбудований модуль Bluetooth для налаштування та моніторингу параметрів батареї. Для обраної моделі в комплекті передбачені датчик температури з кабелем довжиною 40 см, балансувальні дроти з роз'ємом довжиною 75 см.[6]



Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд «BMS JKBMS B1A8S20PR»[6]

Шість видів захисту акумулятора в JK BMS[6]:

- Захист від короткого замикання
- Захист від перезаряду (можливість налаштування граничної напруги)
- Захист від перерозряду (можливість налаштування граничної напруги)
- Захист струму (налаштування захисту від перевантаження великим струмом, налаштовуваний параметр)

- Захист від перегріву та контроль за низькою температурою з можливістю управління нагрівальним елементом
- Контроль підключення та обриву балансувального з'єднання

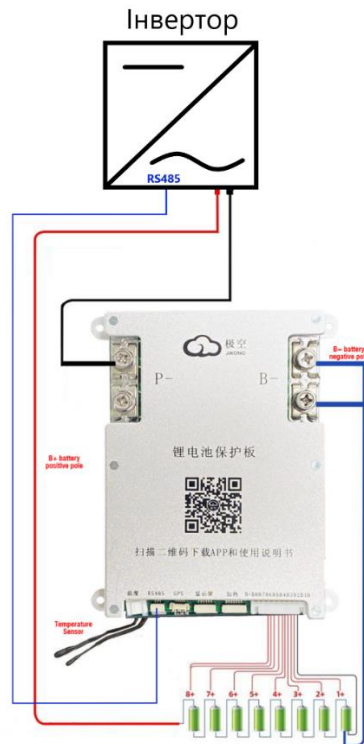


Рисунок 2.4 – Схема підключення комірок та інвертора до «BMS JK BMS B1A8S20PR»

Для механічного складання батарейного блока додатково обрано склотекстолітові ізолятори для комірок. Їх застосування потрібне тому, що корпус LiFePO₄-комірок може виконувати роль позитивної клеми, а отже без додаткової ізоляції існує ризик пробоя або короткого замикання між сусідніми елементами. Використання ізоляторів забезпечує електричне розділення сусідніх комірок, підвищує безпечність конструкції та стабільність роботи батарейного блока.



Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд склотекстолітових листів[8]

Для електричного з'єднання комірок обрано монтажний комплект із мідною перемичкою та кріпленням М6. Такий комплект використовується для з'єднання сусідніх комірок у послідовний ланцюг і забезпечує надійну провідність при роботі батареї на значних струмах.



Рисунок 2.6 – Мідна перемичка для комірок[9]

2.4 Підбір фотоелектричних модулів та параметрів фотоелектричного масиву

Фотоелектричний масив є основним джерелом генерації електроенергії в денний час, тому його параметри повинні бути узгоджені з вхідними характеристиками інвертора. Для моделі інвертора Q-Power Axpert VM III 3000-24 максимальна потужність фотоелектричного масиву становить 4000 Вт. Обрано фотоелектричні модулі «Longi LR8-48HGD-440M» номінальною потужністю 440 Вт.

Таблиця 2.2 – Характеристики фотомодуля «Longi LR8-48HGD-440M»[10]

Модель	LR8-48HGD-440M
Максимальна потужність	440 Вт
Напруга холостого ходу	34,84 В
Струм короткого замикання	16,01 А
Робоча напруга	28,75 В
Робочий струм	15,31 А

У такому випадку сумарна встановлена потужність фотоелектричного масиву становитиме:

$$P_{pv} = 9 \cdot 440 = 3960 \text{ Вт}$$

Отримане значення не перевищує максимально допустиму потужність фотоелектричного входу інвертора.

Напруга в точці максимальної потужності для одного фотомодуля дорівнює 28,75 В, тому для дев'яти послідовно з'єднаних модулів отримаємо:

$$U_{mp} = 9 \cdot 28,75 = 258,75 \text{ В}$$

Отримане значення знаходиться в межах робочого діапазону MPPT інвертора 120–450 В.

Також потрібно перевірити напругу холостого ходу в умовах низької температури, оскільки зі зниженням температури вона зростає. Для цього використовується температурний коефіцієнт напруги холостого ходу, який для обраного фотомодуля становить $-0,230\%/^{\circ}\text{C}$ [10].

Температуру навколишнього середовища приймаємо -20°C , отримаємо:

$$U_{hx} = 34,84 \cdot (1 + (-0,23/100) \cdot ((-20) - 25)) = 38,45$$

Тоді напруга холостого ходу стрінга з дев'яти послідовно з'єднаних модулів становитиме:

$$U_{hx.стр} = 38,45 \cdot 9 = 346,05 \text{ В}$$

За температури -20°C напруга холостого ходу стрінга залишається меншою за гранично допустиме значення 450 В.

Отже, обраний фотоелектричний масив є придатним для використання у складі розроблюваної автономної системи.

2.5 Вибір засобів захисту автономної системи

Для реалізації автономної системи резервного електроживлення на базі інвертора потужністю 3 кВт існуючий квартирний щит потребує реконструкції. Це пов'язано з тим, що початкова схема щита була розрахована лише на традиційне живлення від зовнішньої мережі та не передбачала наявності додаткового джерела електроенергії, а також ручного перемикавання пріоритетних навантажень між різними режимами роботи. У зв'язку з цим доцільно замінити наявний щит на щит

більшого розміру, у якому можна розмістити додаткові апарати захисту, комутації та окремі шини для організації нової структури живлення.

Вихідна схема щита містила ввідний автоматичний вимикач на 25 А, пристрій захисту від імпульсних перенапруг на стороні змінного струму, п'ять автоматів для розеткових груп і два автомати для освітлення. Розеткові групи виконані на диференційних автоматичних вимикачах з номінальним струмом 16 А і струмом витоку 30 мА. Групи освітлення виконані на автоматичних вимикачах з номінальним струмом 10 А.

Основна ідея реконструкції полягає в тому, що всі навантаження будинку поділяються на дві частини: неперіоритетні, які залишаються підключеними безпосередньо до ввідного автомата щита, та пріоритетні, які можуть отримувати живлення або через інвертор, або напряду від мережі в обхід інвертора. Такий підхід дозволяє, з одного боку, резервувати лише найбільш важливі споживачі, а з іншого – зберегти можливість їх безперервного живлення навіть у разі технічного обслуговування, переналаштування або ремонту інвертора.

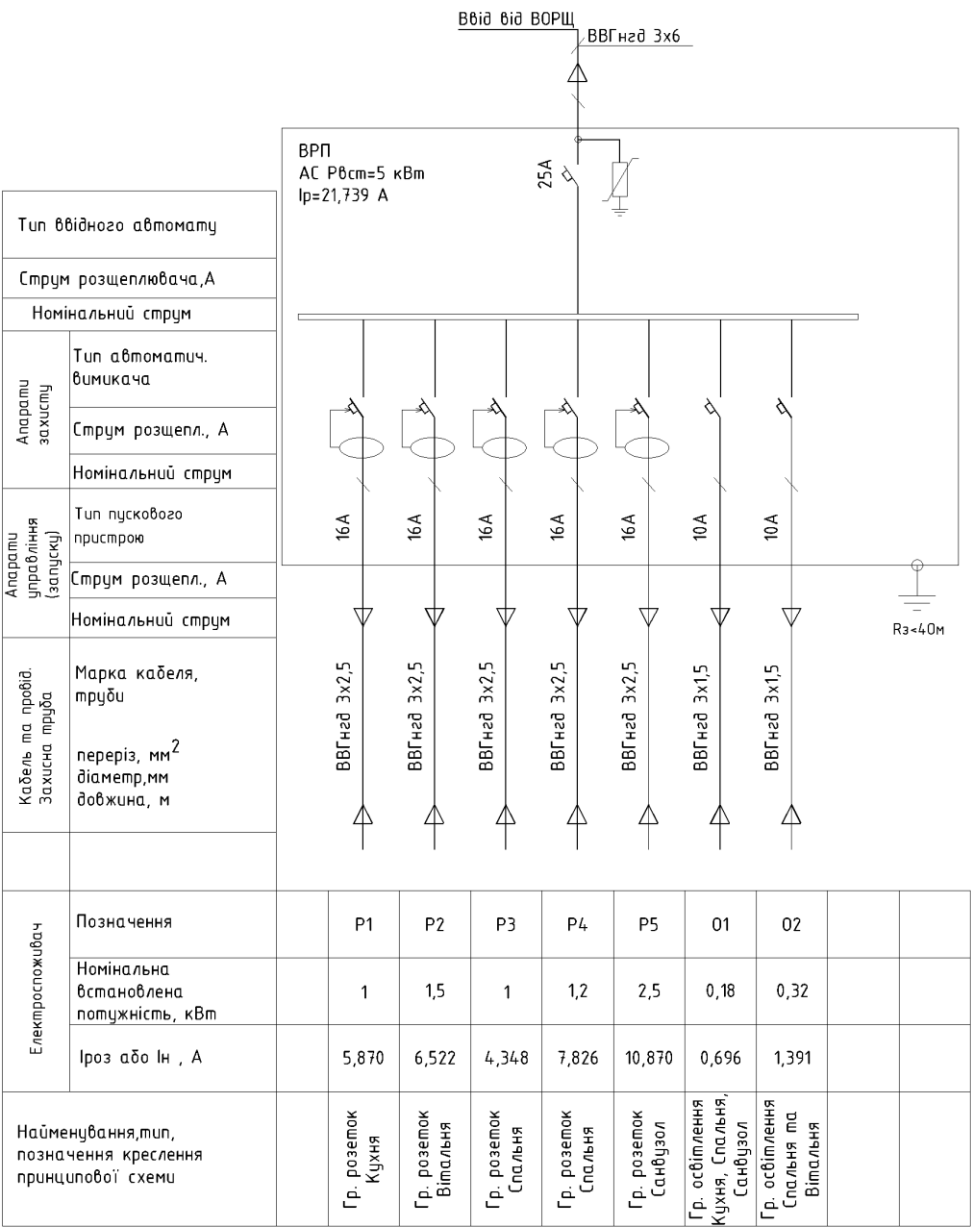


Рисунок 2.7 – Однолінійна схема щита до реконструкції

Після реконструкції від ввідного автоматичного вимикача 25 А безпосередньо живляться частина групових ліній, які не належать до кола резервування. Одночасно від цього ж ввідного автомата передбачається окрема лінія на автоматичний вимикач 20 А, який використовується для захисту вхідного кола інвертора. Через цей автомат на інвертор подається електроенергія зовнішньої мережі. Такий апарат потрібен для захисту кабельної лінії, що підводить живлення до інвертора, а також для можливості його окремого відключення від мережі під час виконання сервісних або налагоджувальних робіт. Для інвертора потужністю 3 кВт робочий струм на стороні 230 В становить приблизно 13 А, тому використання автомата на 20 А є технічно обґрунтованим за умови відповідності вибраного перерізу кабелю.

Ключовим елементом реконструйованої схеми є трипозиційний перемикач навантаження, за допомогою якого здійснюється вибір джерела живлення для пріоритетних споживачів. На вхід “1” цього перемикача подається напруга з виходу інвертора, на вхід “2” – напруга безпосередньо від ввідного автоматичного вимикача щита, а положення “0” відповідає повному відключенню пріоритетної частини щита. Вихід перемикача з’єднується з окремою шиною живлення пріоритетних споживачів.



Рисунок 2.8 – Трипозиційний перемикач навантаження[14]

Призначення такого перемикача полягає в забезпеченні двох основних режимів роботи. У положенні “1” електроенергія надходить із мережі на інвертор, а далі з виходу інвертора подається на вибрані пріоритетні групи. Саме в цьому режимі реалізується функція резервного живлення та робота системи керування пріоритетами навантажень. У положенні “2” пріоритетні споживачі живляться напряму від мережі, оминаючи інвертор. Це необхідно в тих випадках, коли інвертор тимчасово виведений з роботи, наприклад для технічного обслуговування, оновлення налаштувань, діагностики або ремонту. Таким чином, навіть за недоступності інвертора найбільш важливі групи не залишаються без електроживлення.

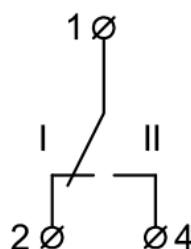


Рисунок 2.9 – Принципова схема роботи трипозиційного перемикача навантаження

Від вихідної шини трипозиційного перемикача живляться лише ті групи, які віднесені до пріоритетних. У даному проєкті до них належать дві розеткові групи, захищені диференційними автоматичними вимикачами 16 А, 30 мА, а також одна група освітлення, захищена автоматичним вимикачем 10 А. Така конфігурація відповідає раніше проведеному аналізу навантажень і дозволяє жити лише ті споживачі, які мають бути забезпечені електроенергією під час зникнення напруги в зовнішній мережі. Застосування окремих групових апаратів захисту для пріоритетної шини дозволяє зберегти селективність відключення: у разі аварії вимикається лише пошкоджена лінія, а не вся резервована частина системи.

Окрему увагу необхідно приділити захисту фотоелектричної частини системи, тобто лінії від фотомодулів до інвертора. На стороні постійного струму в щиті передбачається встановлення пристрою захисту від імпульсних перенапруг 500/20, 2Р, DC, а також двох запобіжників 20 А – окремо для позитивного та негативного полюсів стрінгу. Також у щиті встановлюються відповідні тримачі запобіжників.



Рисунок 2.10 – Пристрій захисту від імпульсних перенапруг для DC[13]

Пристрій захисту від імпульсних перенапруг на стороні постійного струму потрібен для захисту входу інвертора та кабельної лінії від перенапруг, які можуть виникати внаслідок грозових впливів або комутаційних процесів у довгих DC-лініях. Фотоелектричні модулі, розташовані зовні будівлі, є більш вразливими до подібних впливів, тому застосування такого апарата є необхідним елементом захисту автономної системи. Вибраний двополіусний варіант забезпечує захист обох полюсів постійного кола.

Запобіжники 20 А на позитивному і негативному провідниках виконують функцію захисту стрінгу та кабельної лінії постійного струму від надструмів і

можливих аварійних режимів. Крім захисної функції, наявність тримачів запобіжників спрощує технічне обслуговування та дає змогу за необхідності оперативно від'єднати лінію фотомодулів від інвертора. У комплексі з пристроєм захисту від імпульсних перенапруг ці елементи формують базовий захист DC-частини системи.



Рисунок 2.11 – Запобіжник плавкий[15]



Рисунок 2.12 – Утримувач запобіжника[16]

Окремо в автономній системі необхідно передбачити захист акумуляторного кола між батарейним блоком та інвертором. Незважаючи на наявність BMS, яка виконує функції контролю та захисту комірок від перезаряду, перерозряду, перевищення струму та перегріву, у силовому колі акумулятора доцільно встановити ще й окремий апарат зовнішнього захисту та відключення. Це пояснюється тим, що батарейна лінія працює на значних струмах, а її коротке замикання або аварійне перевантаження може призвести до пошкодження кабельних з'єднань, інвертора або самої акумуляторної установки.



Рисунок 2.13 – Автоматичний двополюсний вимикач 150А постійного струму для акумулятора «DZ47B-125»[18]

Для інвертора Axpert VM III виробник прямо вказує на необхідність встановлення окремого пристрою захисту від надструму або роз'єднувача між акумулятором та інвертором, а для моделі 3 кВт наводить типовий струм батарейного кола близько 142 А. Крім того, у керівництві до інвертора для батарейного кола моделі 3 кВт наведено захист на 150 А. У даній роботі для цієї функції обрано автоматичний двополюсний вимикач постійного струму DZ47B-125 на 150 А, який забезпечує як захист акумуляторної лінії від надструмів, так і можливість ручного відключення батарейного блоку від інвертора.

Таким чином, реконструкція щита є необхідною умовою для безпечного та надійного підключення автономної системи. Вона забезпечує правильний розподіл пріоритетних і непріоритетних навантажень, можливість резервного живлення вибраних груп споживачів, а також зручність експлуатації системи під час обслуговування інвертора. Підсумкова схема щита після реконструкції наведена на рисунках 2.14 та 2.15.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ EMS. ВИБІР ПЛАТФОРМИ.

3.1 Вибір мікроконтролерної платформи для реалізації EMS-контролера

Для реалізації зовнішнього контролера керування енергопотоками автономної системи доцільно використати мікроконтролерну платформу STM32, а саме модель «NUCLEO-H563ZI»

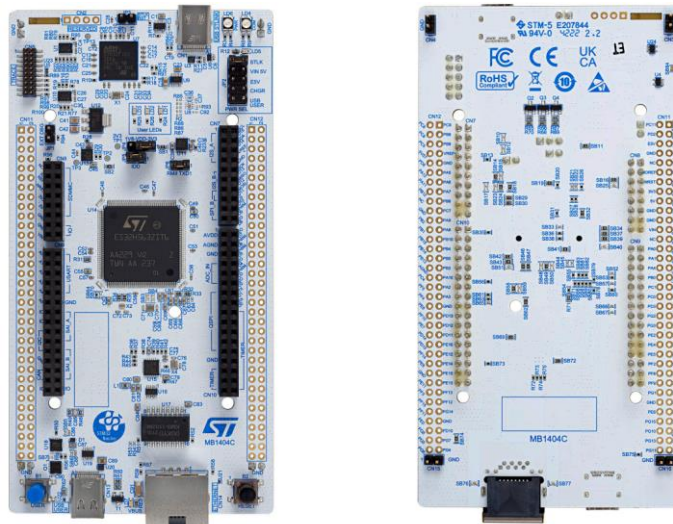


Рисунок 3.1 – Мікроконтролер «NUCLEO-H563ZI»[11]

Вибір саме цієї платформи зумовлений тим, що вона забезпечує достатні обчислювальні ресурси, розвинений набір периферійних модулів, зручні засоби програмної розробки та можливість подальшого розширення функціоналу системи. В межах даної роботи мікроконтролер повинен виконувати не лише прості логічні операції, а й отримувати сигнали від інвертора, реалізовувати алгоритм перемикання режимів «Економ» і «Блекаут», формувати керуючі команди для інвертора та забезпечувати індикацію роботи системи. Для такого набору задач платформа STM32 є достатньо функціональною і технічно придатною.

Однією з головних причин вибору STM32 є наявність розвинених апаратних засобів зв'язку. Для взаємодії з інвертором у даній роботі передбачається використання послідовного інтерфейсу, тому мікроконтролер повинен мати вбудовані модулі UART/USART [11] для передавання та приймання команд.

Для мікроконтролерів STM32 доступне середовище розробки «STM32CubeIDE», яке дозволяє виконувати налаштування периферії, створювати структуру проєкту, реалізовувати програмну логіку мовою C та здійснювати налагодження програми.

3.2 Реалізація інтерфейсу зв'язку між EMS-контролером та інвертором

Для реалізації зовнішнього керування інвертором необхідно організувати надійний канал обміну даними між EMS-контролером та інвертором. Для моделі Q-Power Axpert VM III 3000-24 доцільно використовувати саме інтерфейс RS-232, оскільки в керівництві користувача він прямо позначений як окремий комунікаційний порт інвертора.

На стороні мікроконтролерної платформи STM32 NUCLEO-H563ZI безпосереднього входу RS-232 немає, оскільки мікроконтролер працює з логічними рівнями UART/USART 3,3 В. Тому між інвертором і контролером необхідно встановити перетворювач рівнів UART ↔ RS-232. Як конкретне рішення доцільно застосувати модуль SparkFun RS232 Breakout, модель BOB-29197.



Рисунок 3.2 – Модуль-перехідник «SparkFun RS232 Breakout»[12]

Цей модуль призначений для підключення 3,3-вольтових мікроконтролерів до пристроїв RS-232, має роз'єм DE9 (DB9) і виконує внутрішнє перехресне з'єднання ліній передавання та приймання. На стороні TTL(мікроконтролера) інтерфейсу для підключення використовуються лише контакти VCC, GND, TX та RX.

На стороні контролера для організації зв'язку доцільно використати апаратний послідовний інтерфейс USART3. Тому підключення виконується таким

чином: контакт 3V3 плати STM32 з'єднується з VCC перетворювача, контакт GND – з GND, вивід PD8 (USART3_TX) підключається до контакту RX перетворювача, а вивід PD9 (USART3_RX) – до контакту TX. Таким чином, лінії передавання і приймання з'єднуються перехресно, що забезпечує коректний двобічний обмін даними між контролером і модулем-перетворювачем.

На стороні інвертора підключення реалізується через кабель RJ45- DB9, який входить до комплекту інвертора. Один кінець цього кабелю підключається до порту RS-232 communication інвертора, а другий — до роз'єму DE9 модуля SparkFun RS232 Breakout.

Принцип роботи інтерфейсу полягає в тому, що мікроконтролер формує команду у форматі UART, після чого модуль BOB-29197 перетворює її у формат електричних рівнів RS-232, придатний для інвертора. У зворотному напрямку відповіді інвертора, отримані по RS-232, перетворюються модулем у логічні рівні UART і надходять на вхід мікроконтролера. Сам інвертор підтримує командний обмін через RS-232-протокол, у якому команди передаються у вигляді текстового рядка з контрольною сумою CRC та завершальним символом, а у відповідь інвертор повертає підтвердження виконання або відмову. Для прикладу, команда POP<NN> використовується для встановлення пріоритету джерела живлення навантаження, а команда PCP<NN> – для вибору пріоритету заряджання.

3.3 Розроблення алгоритму керування режимами «Економ» і «Блекаут» за допомогою EMS-контролера

Для забезпечення гнучкої роботи автономної системи електроживлення в роботі передбачено два режими функціонування зовнішнього EMS-контролера: «Економ» та «Блекаут». Необхідність введення двох окремих режимів пояснюється тим, що в різних умовах експлуатації система повинна вирішувати різні задачі. У звичайних умовах основною метою є зменшення витрат на електроенергію за рахунок використання нічного тарифу та фотоелектричної генерації. В умовах можливих або запланованих відключень електроенергії основним завданням стає не економія, а збереження заряду акумуляторної батареї для гарантованого резервного живлення споживачів.

Режими роботи вибираються користувачем вручну за допомогою двох кнопок, підключених до мікроконтролера EMS-контролера. Перша кнопка відповідає за вибір режиму «Економ», друга – за вибір режиму «Блекаут». Для спрощення користування системою передбачено світлодіодну індикацію: над кожною кнопкою розташований світлодіод, при цьому зеленим кольором постійно світиться індикатор того режиму, який є активним у поточний момент. Такий підхід дозволяє користувачеві візуально контролювати стан системи та уникати помилок під час вибору режиму.

Режим «Економ» орієнтований на зниження витрат на електроенергію за рахунок використання нічного тарифу. Передбачається, що споживач має двозонний облік електроенергії, при якому в період з 23:00 до 07:00 вартість електроенергії є нижчою, ніж у денний час у два рази. Саме тому в нічний період контролер формує такий режим роботи системи, за якого навантаження, підключене до інвертора, живиться від мережі, а акумуляторна батарея одночасно заряджається від дешевої нічної електроенергії. Після завершення нічного періоду, тобто з 07:00 до 23:00, система переходить до режиму використання накопиченої та сонячної енергії. У цей інтервал пріоритет надається фотоелектричному масиву та акумуляторній батареї. Це означає, що навантаження, підключене до інвертора, повинно живитися насамперед від сонячної генерації, а за її нестачі – від акумуляторної батареї, яка була попередньо заряджена в нічний час. Таким чином, денне споживання максимально переноситься на сонячну та накопичену енергію, що знижує обсяг споживання дорогої денної електроенергії з мережі.

У режимі «Економ» принципово важливим є те, що в денний період акумулятор не повинен заряджатися від мережі. Якщо впродовж дня рівень заряду батареї знижується, то до 23:00 її підзарядка від мережі не виконується. Заряд у денний час допускається лише від фотоелектричних модулів, і тільки за умови, що сонячна генерація перевищує поточне споживання навантаження. У такому випадку надлишок сонячної енергії може бути використаний для часткового відновлення заряду акумулятора. У даному алгоритмі приймається, що нижня допустима межа використання акумуляторної батареї становить 20%. Після досягнення цього рівня подальший розряд не допускається, а навантаження переходить на живлення від мережі з можливим одночасним використанням

сонячної енергії. Це дозволяє уникнути надмірного розряду батареї та забезпечує її безпечну експлуатацію. Після настання 23:00 заряджання акумуляторної батареї від мережі знову дозволяється, і цикл повторюється.

Отже, режим «Економ» реалізує такий алгоритм:

- у період 23:00–07:00 мережа живить навантаження та заряджає акумулятор;
- у період 07:00–23:00 навантаження живиться від сонячної енергії та акумулятора;
- у денний час заряджання акумулятора від мережі заборонене;
- при досягненні мінімально допустимого рівня заряду акумулятора навантаження переходить на мережу, а відновлення заряду від мережі дозволяється лише після 23:00.

Таким чином, режим «Економ» є доцільним у звичайних умовах експлуатації, коли головною метою є зменшення вартості спожитої електроенергії.

Режим «Блекаут» призначений для роботи в умовах можливих або планових відключень електроенергії. Його головна ідея полягає в тому, щоб максимально зберегти заряд акумуляторної батареї до моменту фактичного зникнення мережі. На відміну від режиму «Економ», де батарея активно використовується в денний час для живлення навантаження, у режимі «Блекаут» акумулятор повинен залишатися резервним джерелом енергії.

У цьому режимі, поки напруга зовнішньої мережі присутня, навантаження, підключене до інвертора, живиться від мережі. Тобто акумулятор не витрачає свій заряд на покриття денного навантаження, якщо в мережі є напруга. Такий підхід дозволяє зберегти запас енергії в батареї до моменту реальної аварійної ситуації.

У разі зникнення мережі система автоматично переходить у режим резервного живлення. У цей момент навантаження починає житися від акумуляторної батареї та фотоелектричного масиву. Якщо сонячна генерація присутня, вона бере участь у живленні навантаження та зменшує швидкість розряду батареї. Якщо сонячної енергії недостатньо, відсутня генерація або вона нестабільна, основне живлення забезпечує акумулятор. Саме завдяки тому, що в режимі «Блекаут» батарея не витрачається у нормальних умовах без відключень світла, зменшується ризик ситуації, коли відключення електроенергії відбувається

вже після повного або майже повного розряду акумуляторної установки. Необхідність такого режиму пояснюється практичною ситуацією, коли батарея за своїм запасом енергії розрахована, наприклад, на 4 години автономної роботи. Якщо в режимі «Економ» цей запас буде витрачений упродовж дня, а відключення мережі відбудеться пізніше, система може залишитися без резервного джерела живлення. У режимі «Блекаут» така ситуація виключається, оскільки акумулятор зберігається саме для аварійного живлення.

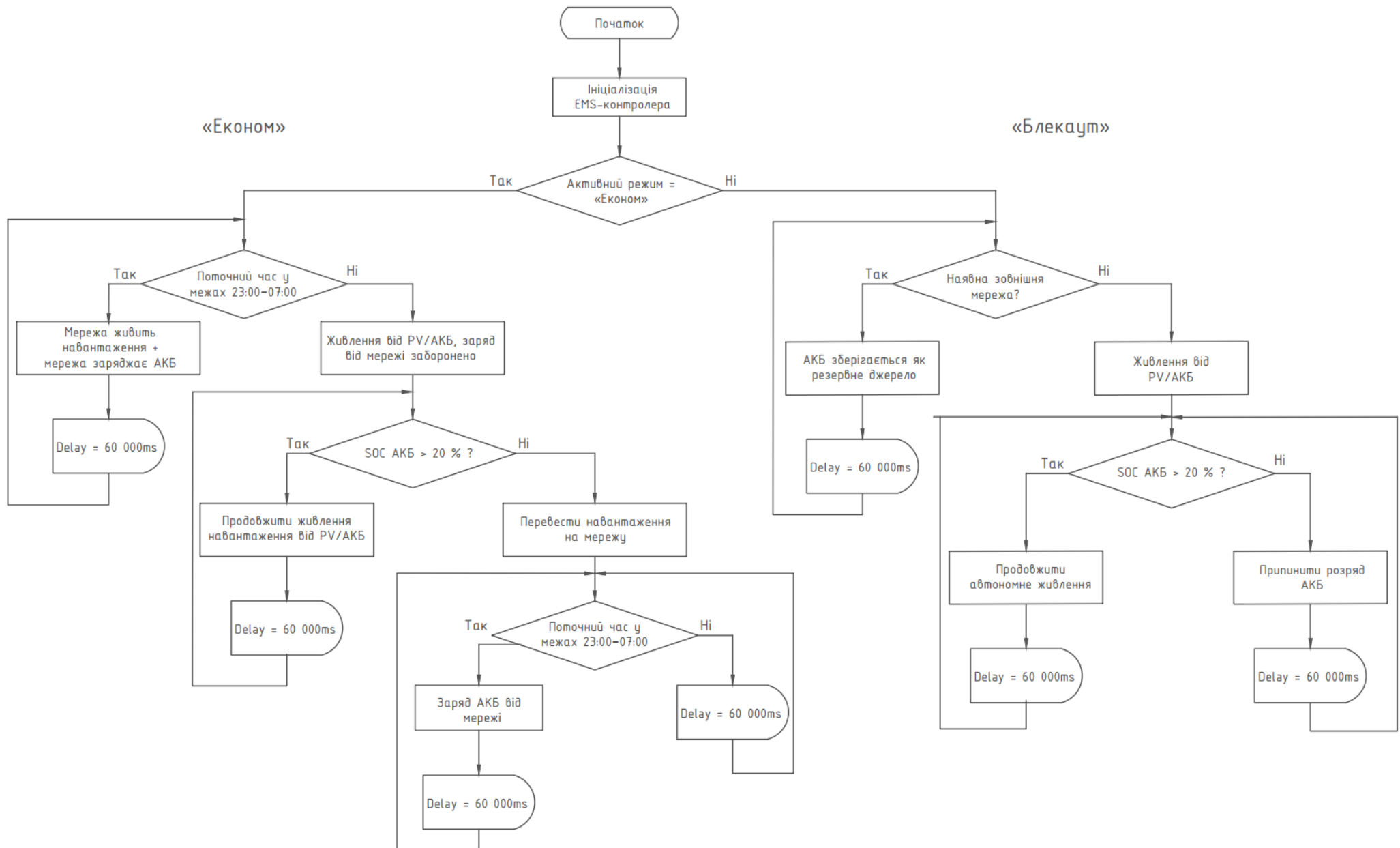


Рисунок 3.3 – Блок-схема режимів «Економ» та «Блекаут»

3.4 Реалізація віддаленого керування пріоритетними навантаженнями на основі Wi-Fi розеток

Як було встановлено в попередніх розділах, до другого рівня пріоритетності в даній роботі належать комп'ютер, мікрохвильова піч, три зарядні пристрої та телевізор. Загалом це шість окремих споживачів, тому для їх індивідуального керування доцільно застосувати шість розумних розеток. У ролі такого виконавчого пристрою обрано модель Shelly Plug S MTR Gen3.



Рисунок 3.4 – Розумна розетка «Shelly Plug S MTR Gen3»[17]

Вона підтримує роботу в локальній Wi-Fi мережі, має вбудований вебінтерфейс, функцію вимірювання потужності та допускає комутацію навантаження до 12 А, або 2500 Вт для активного навантаження.

Також дана модель може працювати автономно в локальній мережі без обов'язкового використання хмарних сервісів, що є важливим для побудови локальної системи керування на базі мікроконтролера.

Вибір саме локального способу керування є принциповим. У такій структурі мікроконтролер і Wi-Fi розетки підключаються до однієї домашньої мережі, а передавання команд виконується безпосередньо між пристроями. Для розеток Shelly MTR Gen3 доступне локальне HTTP-керування через endpoint виду `/relay/id`, де параметр `turn` може приймати значення `on`, `off` або `toggle`. Це означає, що мікроконтролер може надсилати прості HTTP-запити до кожної конкретної розетки за її локальною IP-адресою та таким чином вмикати або вимикати потрібний споживач. Така реалізація є технічно простою, не потребує складних проміжних шлюзів.

Отримання інформації про стан акумуляторної батареї виконується від

інвертора через інтерфейс RS-232, який уже був обґрунтований у підрозділі 3.2. Для цього EMS-контролер періодично надсилає до інвертора команду QPIGS, що використовується для запиту загального стану системи. У відповіді на цю команду міститься поле Battery capacity, яке задається у відсотках і може бути використане як основний керуючий параметр для прийняття рішення про відключення навантажень другого рівня. Таким чином, мікроконтролер отримує від інвертора фактичний рівень заряду акумуляторної батареї, обробляє це значення та, за необхідності, формує керуючі команди для Wi-Fi розеток.

З урахуванням виконаних у другому розділі розрахунків порогове значення відключення другого рівня пріоритетності приймається рівним 40%. Такий поріг дозволяє зберегти частину корисної енергії акумуляторної батареї для подальшого живлення споживачів першого рівня у разі затримки відновлення зовнішнього електропостачання. Для уникнення частого вмикання та вимикання розеток біля одного порогового значення використано два різні рівні спрацювання.

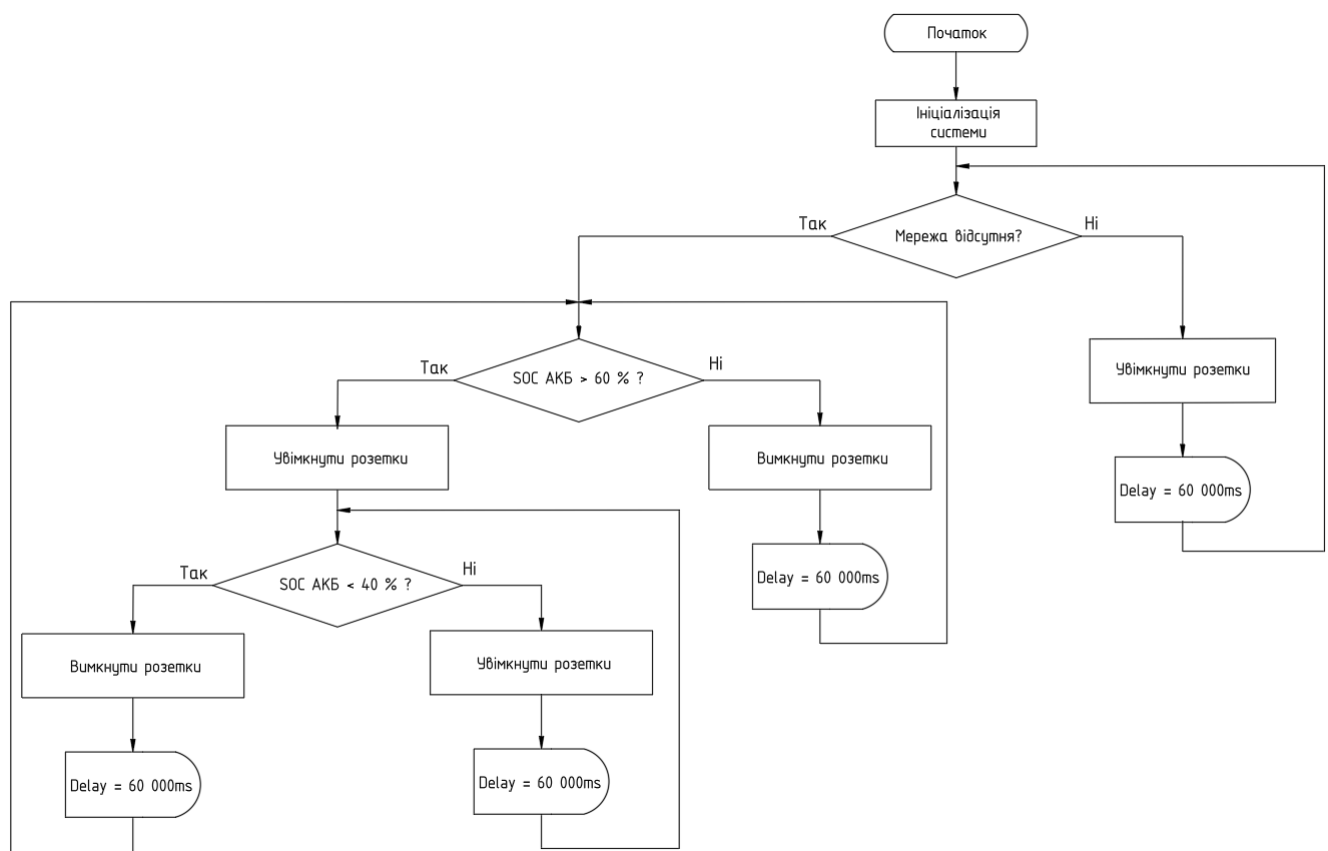


Рисунок 3.5 – Блок-схема алгоритму роботи розеток

Вимкнення розеток виконується при $SOC \leq 40\%$, а повторне увімкнення в автономному режимі дозволяється лише після підвищення рівня заряду

аккумуляторної батареї до $SOC \geq 60\%$. Такий принцип запобігає нестабільній роботі розеток при незначних коливаннях рівня заряду.

Якщо зовнішнє електропостачання відновлюється, розетки другого рівня пріоритетності можуть бути ввімкнені незалежно від поточного рівня заряду аккумуляторної батареї, оскільки живлення навантажень у такому випадку забезпечується від мережі.

3.5 Програмна реалізація основних функцій EMS-контролера

На початку програми задаються основні константи системи:

```
#define BTN_ECO_GPIO_Port      GPIOC
#define BTN_ECO_Pin            GPIO_PIN_13

#define BTN_BLACKOUT_GPIO_Port  GPIOE
#define BTN_BLACKOUT_Pin        GPIO_PIN_3

#define LED_ECO_GPIO_Port      GPIOF
#define LED_ECO_Pin            GPIO_PIN_4

#define LED_BLACKOUT_GPIO_Port  GPIOG
#define LED_BLACKOUT_Pin        GPIO_PIN_4

#define SOC_CUTOFF_PERCENT      20U
#define SOC_PRIORITY2_OFF_PERCENT 40U
#define SOC_PRIORITY2_RESTORE_PERCENT 60U

#define NIGHT_START_HOUR        23U
#define NIGHT_END_HOUR          7U
```

Рисунок 3.6 – Основні константи програмного коду

У цьому фрагменті визначено прив'язку кнопок вибору режимів та світлодіодної індикації до портів мікроконтролера, а також встановлено основні порогові параметри алгоритму. Зокрема, у коді зафіксовано нижню допустиму межу заряду аккумуляторної батареї 20%, поріг автоматичного відключення навантажень другого рівня при 40% та поріг їх повторного ввімкнення при 60%. Окремо задається інтервал нічного тарифу з 23:00 до 07:00, який використовується в режимі «Економ».

Основний цикл програми побудований за класичним для вбудованих систем принципом безперервного опитування та обробки подій.

```

int main(void)
{
    HAL_Init();
    SystemClock_Config();

    MX_GPIO_Init();
    MX_USART3_UART_Init();
    MX_RTC_Init();
    MX_LWIP_Init();

    EMS_Init();

    while (1)
    {
        MX_LWIP_Process();
        EMS_Process();
    }
}

```

Рисунок 3.7 – Головний цикл програми

Після ініціалізації апаратних модулів мікроконтролера – портів GPIO, інтерфейсу USART3, годинника реального часу RTC та мережевого стека LwIP – виконується ініціалізація EMS-контролера. Далі програма безперервно виконує дві основні функції: підтримує мережевий обмін із розумними розетками Shelly та виконує основний алгоритм керування енергопотоками через функцію EMS_Process().

Вибір режимів «Економ» і «Блекаут» реалізовано через окрему функцію обробки кнопок.

```

static void EMS_HandleButton(GPIO_TypeDef *port,
                             uint16_t pin,
                             GPIO_PinState *raw_last,
                             GPIO_PinState *stable,
                             uint32_t *last_change_tick,
                             EmsMode mode_to_set)
{
    GPIO_PinState raw_now = HAL_GPIO_ReadPin(port, pin);
    uint32_t now = HAL_GetTick();

    if (raw_now != *raw_last)
    {
        *raw_last = raw_now;
        *last_change_tick = now;
    }

    if ((now - *last_change_tick) >= BUTTON_DEBOUNCE_MS)
    {
        if ((*stable != raw_now) && (raw_now == BUTTON_ACTIVE_LEVEL))
        {
            *stable = raw_now;
            g_ems.selected_mode = mode_to_set;
            EMS_UpdateLeds();
        }
        else if ((raw_now != BUTTON_ACTIVE_LEVEL) && (*stable != raw_now))
        {
            *stable = raw_now;
        }
    }
}

```

Рисунок 3.8 – Обробка кнопок і вибір режиму

У програмі використано програмний антидребезг контактів: після зміни стану кнопки контролер очікує заданий інтервал часу `BUTTON_DEBOUNCE_MS` і лише після цього вважає натискання достовірним. Якщо натискання підтверджено, у змінну `selected_mode` записується новий режим роботи, а функція `EMS_UpdateLeds()` одразу оновлює індикацію. Такий підхід дозволяє уникнути помилкових спрацювань і забезпечує стабільне ручне керування режимами системи.

Обмін даними між EMS-контролером та інвертором реалізовано через інтерфейс `USART3` за протоколом `RS-232`.

```
static bool Axpert_SendAndReceive(const char *cmd_ascii, char *payload_out, size_t payload_size)
{
    uint8_t tx[32] = {0};
    uint8_t rx[160] = {0};
    size_t tx_len = 0;
    size_t rx_len = 0;

    tx_len = Axpert_BuildCommand(cmd_ascii, tx, sizeof(tx));
    if (tx_len == 0U)
    {
        return false;
    }

    __HAL_UART_FLUSH_DRREGISTER(&huart3);

    if (HAL_UART_Transmit(&huart3, tx, (uint16_t)tx_len, UART_TX_TIMEOUT_MS) != HAL_OK)
    {
        return false;
    }

    if (!Axpert_ReadResponse(rx, sizeof(rx), &rx_len))
    {
        return false;
    }
}
```

Рисунок 3.9 – Формування і передавання команди

У програмі сформовано окрему функцію `Axpert_SendAndReceive()`, яка буде у форматі протоколу `Axpert`, передає її на інвертор та приймає відповідь.

Однією з основних команд є `QPIGS`, що використовується для запиту поточних параметрів інвертора.

```
if (!Axpert_SendAndReceive("QPIGS", payload, sizeof(payload)))
{
    return false;
}
```

Рисунок 3.10 – Зчитування SOC за допомогою команди «QPIGS»

Саме з цієї відповіді контролер отримує значення рівня заряду акумуляторної батареї, яке далі використовується для прийняття рішень у логіці EMS-керування

та у функції автоматичного відключення навантажень другого рівня пріоритетності.

Окремим елементом програмної реалізації є керування Wi-Fi розетками Shelly Plug S MTR Gen3, до яких підключено споживачів другого рівня пріоритетності. Для формування команд використовується локальний HTTP-запит типу GET, який контролер надсилає на IP-адресу конкретної розетки.

```
snprintf(request, sizeof(request),
         "GET /relay/0?turn=%s HTTP/1.1\r\n"
         "Host: %s\r\n"
         "Connection: close\r\n\r\n",
         turn_on ? "on" : "off", ip);
```

Рисунок 3.11 – Фрагмент HTTP-запиту

Основна логіка реалізована у функції EMS_UpdatePriority2Sockets().

```
static void EMS_UpdatePriority2Sockets(void)
{
    if (g_ems.soc_percent <= SOC_PRIORITY2_OFF_PERCENT)
    {
        if (g_ems.priority2_enabled)
        {
            Shelly_SetAllPriority2(false);
            g_ems.priority2_enabled = false;
        }
        return;
    }

    if (!g_ems.priority2_enabled)
    {
        if (g_ems.grid_present)
        {
            Shelly_SetAllPriority2(true);
            g_ems.priority2_enabled = true;
            return;
        }

        if (g_ems.soc_percent >= SOC_PRIORITY2_RESTORE_PERCENT)
        {
            Shelly_SetAllPriority2(true);
            g_ems.priority2_enabled = true;
        }
    }
}
```

Рисунок 3.12 – Логіка керування розетками в залежності від заряду акумулятора

Якщо рівень заряду акумулятора знижується до 40% або нижче, контролер автоматично вимикає всі розетки другого рівня пріоритетності. Повторне ввімкнення виконується або одразу після появи зовнішньої мережі, або після

відновлення рівня заряду батареї до 60% у випадку, коли мережа залишається відсутньою. Такий підхід дозволяє уникнути частого вмикання і вимикання навантажень поблизу одного порогу заряду та робить систему стабільнішою в умовах несталої сонячної генерації.

Для реалізації режиму «Економ» у програмі використовується годинник реального часу RTC. Під час першого запуску контролер виконує початкове встановлення дати та часу, після чого записує службову мітку у backup-register.

```
static void EMS_LoadDefaultRtcIfNeeded(void)
{
    if (HAL_RTCEx_BKUPRead(&hrtc, RTC_BKP_DR1) == RTC_MAGIC_WORD)
    {
        return;
    }

    HAL_RTC_SetTime(&hrtc, &sTime, RTC_FORMAT_BIN);
    HAL_RTC_SetDate(&hrtc, &sDate, RTC_FORMAT_BIN);
    HAL_RTCEx_BKUPWrite(&hrtc, RTC_BKP_DR1, RTC_MAGIC_WORD);
}
```

Рисунок 3.13 – Первинна ініціалізація RTC

Це дозволяє при наступних увімкненнях не виконувати повторну ініціалізацію, якщо дані RTC були збережені. Окрема функція EMS_IsNightTariffActive() перевіряє, чи поточний час належить до інтервалу нічного тарифу 23:00–07:00.

```
static bool EMS_IsNightTariffActive(void)
{
    uint8_t hour = EMS_GetHour();

    if (NIGHT_START_HOUR > NIGHT_END_HOUR)
    {
        return ((hour >= NIGHT_START_HOUR) || (hour < NIGHT_END_HOUR));
    }
    else
    {
        return ((hour >= NIGHT_START_HOUR) && (hour < NIGHT_END_HOUR));
    }
}
```

Рисунок 3.14 – Перевірка часу для регулювання системи під нічний тариф

Саме це значення далі використовується в логіці режиму «Економ» для вибору моменту заряджання акумулятора від мережі. Для стабільної роботи годинника реального часу RTC у системі передбачено резервне живлення через вивід VBAT мікроконтролера. З цією метою використовується суперконденсатор

«KR-5R5H105-R»[19], який після зникнення основного живлення тимчасово підтримує роботу backup-domain мікроконтролера. Завдяки цьому RTC продовжує відлік часу навіть при вимкненні основного живлення контролера, а значення дати, часу та backup-register не втрачаються одразу. У програмному коді це враховано через перевірку службової мітки у backup-register: якщо мітка присутня, повторна ініціалізація часу не виконується. Таким чином, суперконденсатор забезпечує апаратне збереження ходу годинника, а програмна частина забезпечує правильне використання збережених даних після повторного запуску системи.

3.6 Оцінювання економічної ефективності запропонованого технічного рішення

У межах роботи розглядається інформаційно-вимірювальна система для керування установкою акумулювання електроенергії потужністю до 3 кВт з використанням фотовольтаїчної генерації. Відповідно до заданої теми, система не розраховується на повне резервування всіх побутових електроприймачів будинку, а орієнтується на забезпечення роботи пріоритетних споживачів у межах допустимої потужності інвертора. Це дозволяє розглядати установку акумулювання як технічно обґрунтоване рішення для підтримання базового рівня автономності під час блекаутів.

Для економічного порівняння розглянуто типовий варіант готового рішення на базі гібридного інвертора Deue потужністю 6 кВт та двох акумуляторних батарей ємністю по 5 кВт·год. Такий варіант часто застосовується для однофазних будинків з договірною потужністю 5 кВт, коли більшість споживачів підключаються до інвертора без детального поділу на пріоритетні та непраіоритетні. Однак таке рішення має більшу початкову вартість, оскільки передбачає більший запас за потужністю та ємністю акумуляторних батарей. Отже, наведене порівняння не є порівнянням двох повністю однакових за потужністю систем. Воно показує різницю між типовим готовим рішенням та розробленим у роботі технічним рішенням.

Таблиця 3.1 – Вартість елементів запропонованої системи

№	Найменування	Ціна, грн
1	Інвертор Q-Power Axpert VM III 3000-24	20000
2	BMS JK-B1A8S20PR 200A 8S	2100
3	Елементи EVE 3.2V/230Ah	28480
4	Склотекстолітовий лист	210
5	Монтажний комплект (перемичка + шпилька)	203
6	Сонячні панелі Longi 440W	36000
7	Мікроконтролер NUCLEO-H563ZI	3000
8	SparkFun RS232 Breakout	440
9	ОПН для DC	1200
10	Трипозиційний перемикач навантаження	160
11	Запобіжник плавкий	30
12	Утримувач запобіжника	200
13	Автоматичний двополюсний вимикач 150A постійного струму	1000
14	Суперконденсатор KR-5R5H105-R	90
15	Розетка Shelly Plug S MTR Gen3	6000
16	Бокс монтажний пластиковий	3000
Всього:		102113

Таблиця 3.2 – Вартість типового рішення на базі обладнання Deye

№	Найменування	Ціна, грн
1	Інвертор Deye SUN-6k-SG05LP1-EU	37000
2	Акумуляторна батарея Deye SE-G5.1Pro LiFePO4	74150
3	Сонячні панелі Longi 440W	36000
4	ОПН для DC	1200
5	Трипозиційний перемикач навантаження	160
6	Запобіжник плавкий	30
7	Утримувач запобіжника	200
8	Автоматичний двополюсний вимикач 150A постійного струму	1000
9	Бокс монтажний пластиковий	1500
Всього:		151 240

Різниця у вартості між типовим готовим рішенням та запропонованою

системою становить: $151\,240 - 102\,113 = 49\,127$ грн

Якщо порівнювати, то типове рішення на базі Deye є дорожчим за запропоновану систему приблизно на: $151\,240 / 102\,113 \cdot 100 - 100 = 48,11\%$

Таким чином, основний економічний ефект запропонованого рішення полягає у зменшенні початкових капітальних витрат. Це досягається за рахунок використання менш потужного інвертора, самостійно сформованого акумуляторного блока на базі LiFePO₄-елементів та зовнішньої системи керування, яка реалізує необхідні режими роботи без застосування дорожчого готового рішення з надлишковою потужністю.

Для оцінювання терміну окупності запропонованої системи врахуємо два джерела економії: використання власної сонячної генерації та використання нічного тарифу для заряджання акумуляторної батареї. Станом на період виконання розрахунку фіксована ціна електроенергії для побутових споживачів становить 4,32 грн/кВт·год з ПДВ. Для двозонного обліку в нічний період з 23:00 до 07:00 застосовується коефіцієнт 0,5, тобто нічна ціна становить 2,16 грн/кВт·год з ПДВ.

Кількість фотомодулів – 9 шт. Тоді встановлена потужність фотоелектричної частини становить:

$$P_{\text{сес}} = 9 \cdot 440 = 3960 \text{ Вт} = 3,96 \text{ кВт}$$

Для орієнтовного розрахунку приймаємо питому річну генерацію 1000 кВт·год на 1 кВт встановленої потужності. Тоді річний виробіток електроенергії становитиме:

$$E_{\text{сес}} = 3,96 \cdot 1000 = 3960 \text{ кВт·год/рік}$$

Оскільки частина згенерованої електроенергії може не бути повністю використана споживачем через нерівномірність графіка генерації та споживання, приймаємо коефіцієнт корисного використання сонячної енергії: $k_{\text{коєф}} = 0,8$

Тоді кількість електроенергії, яка буде корисно використана споживачем, становитиме:

$$E_{\text{кор}} = 3960 \cdot 0,8 = 3168 \text{ кВт·год/рік}$$

Річна економія від використання сонячної генерації визначається за формулою:

$$E_{\text{ек.сес}} = E_{\text{кор}} \cdot C_{\text{день}}, \quad (3.1)$$

де $E_{\text{ек.сес}}$ – річна економія від використання сонячної генерації, грн/рік;

$E_{\text{кор}}$ – корисно використана електроенергія від сонячних панелей, кВт·год/рік;

$C_{\text{день}}$ – денний тариф на електроенергію, грн/кВт·год.

Підставивши значення, отримаємо:

$$E_{\text{ек.сес}} = 3168 \cdot 4,32 = 13685,76 \text{ грн/рік}$$

Додатковий економічний ефект може бути отриманий за рахунок використання акумуляторної батареї та нічного тарифу. У нічний період акумуляторна батарея може заряджатися від мережі за нижчим тарифом, а вдень накопичена електроенергія може використовуватися для живлення пріоритетних споживачів. Корисна енергія, яку можна отримати з акумуляторної батареї на стороні змінного струму, становить 4,24 кВт·год.

За умови одного циклу заряду-розряду на добу річна кількість електроенергії, яка може бути перенесена з нічного періоду в денний, становитиме:

$$E_{\text{акб.рік}} = 4,24 \cdot 365 = 1547,37 \text{ кВт·год/рік}$$

Під час заряджання та розряджання акумуляторної батареї виникають втрати енергії. Тому для розрахунку економії від нічного тарифу приймаємо загальний ККД циклу заряджання-розряджання: $\eta_{\text{ц}} = 0,85$

Фактична вартість 1 кВт·год електроенергії, отриманої вдень з акумулятора, буде більшою за нічний тариф, оскільки для отримання 1 кВт·год корисної енергії потрібно зарядити акумулятор більшою кількістю електроенергії. Тому економія з 1 кВт·год визначається за формулою:

$$\Delta C = C_{\text{день}} - C_{\text{ніч}} / \eta_{\text{ц}}, \quad (3.2)$$

де ΔC – економія з 1 кВт·год електроенергії, грн/кВт·год;

$C_{\text{день}}$ – денний тариф на електроенергію, грн/кВт·год;

$C_{\text{ніч}}$ – нічний тариф на електроенергію, грн/кВт·год;

$\eta_{\text{ц}}$ – ККД циклу заряджання-розряджання акумуляторної батареї.

Підставивши значення, отримаємо:

$$\Delta C = 4,32 - 2,16 / 0,85 = 1,7788 \text{ грн/кВт·год}$$

Тоді річна економія від використання нічного тарифу становитиме:

$$E_{\text{ек.ніч}} = 1547,37 \cdot 1,7788 = 2752,49 \text{ грн/рік}$$

Загальна річна економія від роботи системи визначається як сума економії від сонячної генерації та економії від використання нічного тарифу:

$$E_{\text{ек.заг}} = 13685,76 + 2752,49 = 16438,25 \text{ грн/рік}$$

Простий термін окупності запропонованого рішення визначається за формулою:

$$T_{\text{ок}} = K / E_{\text{ек.заг}}, \quad (3.3)$$

де $T_{\text{ок}}$ – простий термін окупності, років;

K – вартість системи, грн;

$E_{\text{ек.заг}}$ – загальна річна економія, грн/рік.

Для запропонованого рішення:

$$T_{\text{ок}} = 102113 / 16438,25 = 6,21 \text{ року}$$

Отже, орієнтовний термін окупності запропонованої системи становить приблизно: $T_{\text{ок}} \approx 6,2$ року

Тобто типове рішення окупиться приблизно за:

$$T_{\text{ок.Дeye}} \approx 9,2 \text{ року}$$

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі розроблено інформаційно-вимірювальну систему для управління установкою акумулювання електроенергії потужністю до 3 кВт з використанням фотовольтаїчної генерації. Запропоноване рішення призначене для керування енергопотоками між фотоелектричними модулями, акумуляторною батареєю, зовнішньою мережею та пріоритетними побутовими навантаженнями.

У процесі аналізу побутових електричних навантажень житлового будинку встановлено доцільність їх поділу на три рівні пріоритетності. До першого рівня віднесено критично важливі споживачі: газовий котел, холодильник, мережевий роутер та енергоощадне освітлення. До другого рівня віднесено навантаження, які можуть працювати в нормальному режимі резервного живлення, але мають відключатися при зниженні заряду акумуляторної батареї. До третього рівня віднесено потужні побутові прилади, живлення яких від інвертора потужністю 3 кВт є недоцільним.

Розрахунки показали, що сумарна пікова потужність усіх розглянутих споживачів становить 8,87 кВт, що перевищує можливості обраного інвертора. Водночас сумарна пікова активна потужність споживачів першого та другого рівнів становить 2,07 кВт. З урахуванням коефіцієнтів потужності для газового котла, холодильника, мікрохвильової печі та комп'ютера уточнена повна потужність пріоритетних навантажень становить близько 2,52 кВА. Це підтверджує, що інвертор потужністю 3 кВт має достатній запас для живлення вибраних споживачів.

Аналіз існуючих інформаційно-вимірювальних систем керування установками акумулювання електроенергії встановлено, що для даної роботи доцільним є використання зовнішнього EMS-контролера. Такий підхід дозволяє не обмежуватися стандартними алгоритмами інвертора, а реалізувати власну логіку керування з урахуванням стану акумуляторної батареї, наявності мережі, часу доби та пріоритетності навантажень.

За результатами розрахунків, виконаних у другому розділі, підібрано основне обладнання автономної фотоелектричної системи з акумуляторною установкою до 3 кВт. Як силовий вузол обрано інвертор Q-Power Axpert VM III 3000-24, який

відповідає потужності пріоритетних навантажень, підтримує роботу з акумуляторною батареєю класу 24 В, має MPPT-контролер для підключення фотоелектричних модулів та підтримує комунікаційний обмін із зовнішнім контролером.

Для накопичення електричної енергії обрано акумуляторну батарею на базі восьми послідовно з'єднаних LiFePO₄-комірок EVE 3,2 В ємністю 230 А·год. Розрахунок параметрів акумуляторної установки з урахуванням коефіцієнтів потужності окремих побутових споживачів показав, що уточнена потреба споживачів першого та другого рівнів за 4 години становить 3,61 кВт·год. Корисний запас енергії обраної батареї з урахуванням допустимої глибини розряду 80% та ККД інвертора 90% становить 4,239 кВт·год. Цього достатньо для живлення споживачів першого та другого рівнів протягом 4 годин, а залишок енергії після цього забезпечує додаткове живлення споживачів першого рівня протягом щонайменше 1 години.

Для контролю та захисту акумуляторного блока обрано BMS JK-B1A8S20PR 200A 8S. Для фотоелектричної частини системи підібрано дев'ять модулів Longi LR8-48HGD-440M потужністю 440 Вт кожен, що формують масив загальною потужністю 3960 Вт. У роботі також обґрунтовано необхідність реконструкції електричного щита з поділом навантажень на пріоритетні та непріоритетні групи, встановленням трипозиційного перемикача навантаження, захисту DC-частини фотоелектричного стрінга та захисту акумуляторного кола.

Мікроконтролерну платформу для реалізації EMS-контролера обрано на базі STM32 NUCLEO-H563ZI. Для зв'язку між контролером та інвертором обґрунтовано використання інтерфейсу RS-232 із перетворювачем рівнів SparkFun RS232 Breakout. Це дозволяє EMS-контролеру отримувати інформацію про стан системи та передавати команди керування інвертору через штатний комунікаційний порт.

Розроблено алгоритми функціонування системи у двох режимах: «Економ» і «Блекаут». У режимі «Економ» передбачено заряджання акумуляторної батареї в період дії нічного тарифу та використання накопиченої енергії разом із фотоелектричною генерацією в денний час. У режимі «Блекаут» основним завданням є збереження заряду акумуляторної батареї для резервного живлення

пріоритетних споживачів у разі зникнення зовнішньої мережі.

Для керування навантаженнями другого рівня пріоритетності передбачено використання розумних розеток Shelly Plug S MTR Gen3. При зниженні рівня заряду акумуляторної батареї до 40% система автоматично відключає ці навантаження, а повторне ввімкнення можливе після відновлення мережі або підвищення заряду до 60%. Такий алгоритм дозволяє зберегти запас енергії для критично важливих споживачів першого рівня.

У програмному забезпеченні EMS-контролера передбачено опитування інвертора, визначення стану мережі, отримання рівня заряду акумуляторної батареї, вибір активного режиму, керування пріоритетами джерел живлення та заряджання, роботу з годинником реального часу і керування розумними розетками. Використання RTC дає змогу реалізувати часову логіку нічного тарифу, а резервне живлення через суперконденсатор забезпечує збереження ходу годинника під час короткочасних знеструмлень контролера.

Економічне оцінювання показало, що вартість запропонованої системи становить 102113 грн. Для порівняння розглянуто типове готове рішення на базі обладнання Deue вартістю 151240 грн. Різниця у вартості складає 49127 грн, тобто типове рішення є дорожчим приблизно на 48,1%. Загальна річна економія від використання сонячної генерації та нічного тарифу становить 16438,25 грн/рік, а простий термін окупності запропонованої системи – приблизно 6,2 року.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Robyns B., Davigny A., Barry H., Kazmierczak S., Saudemont C., Abbes D., François B. Electrical Energy Storage for Buildings in Smart Grids. London; Hoboken: ISTE Ltd; John Wiley & Sons, 2019. 391 с.
2. Tan X., Vezzini A., Fan Y., Khare N., Xu Y., Wei L. Battery Management System and its Applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2023. 389с.
3. Grid-scale Energy Storage Systems and Applications / за ред. Fu-Bao Wu, Bo Yang, Ji-Lei Ye. London ; San Diego ; Cambridge ; Oxford : Academic Press, 2019. 306 с.
4. Axpert VM III Off-Grid Inverter
URL:https://voltronicpower.com/content/download/Brochure/Axpert_VMIII_DS.pdf (дата звернення: 22.03.2026).
5. Hesse H., Schimpe M., Kucevic D., Jossen A. Electric Energy Storage Systems: Flexibility Options for Smart Grids. Berlin ; Boston : Walter de Gruyter GmbH, 2017. 220 с.
6. Manual BMS JK-B1A8S20PR 200A 8S URL:<https://energiepanda.com/wp-content/uploads/2022/11/JK-B2A8S20P-BMS-USER-MANUAL-V1.1V11.pdf> (дата звернення: 22.03.2026).
7. LiFePO4 Елементи EVE 3.2V/230Ah URL:<https://antpower.com.ua/lifepo4-elementy-eve-3.2v-230ah-grade-a-736wh-020mom-komirky-lf230/> (дата звернення: 22.03.2026).
8. Ізолятор для комірок. Склотекстолітовий лист URL:
<https://antpower.com.ua/lifepo4-izoliator-dlia-eve-230-280-306-314ah-sklotekstolitovyi-lyst-207mmkh173mmkh0.5mm> (дата звернення: 22.03.2026).
9. Монтажний комплект (перемичка + шпилька) URL:
<https://antpower.com.ua/montazhnyi-komplekt-peremychka-shpylka-dlia-lifepo4-3.2v-230-280-306-314ah/> (дата звернення: 22.03.2026).
10. Сонячні панелі Longi 440W LR8-48HGD URL: <https://www.sig.energy/wp-content/uploads/2025/07/longi-lr8-48hgd-430-455-datasheet-ua.pdf> (дата звернення: 24.03.2026)

11. Мікроконтролер «NUCLEO-H563ZI» manual URL:
https://www.st.com/resource/en/user_manual/um3115-stm32h5-nucleo144-board-mb1404-stmicroelectronics.pdf (дата звернення: 25.03.2026)
12. SparkFun RS232 Breakout URL: <https://www.sparkfun.com/sparkfun-rs232-breakout.html> (дата звернення: 25.03.2026)
13. Пристрій захисту від імпульсних перенапруг для DC URL:
https://enext.ua/catalog/pzip_serii_e_pro/pristriy_dlya_zakhistu_vid_impulsnikh_perenaprug_e_pro_spd_2dc_500_2p_dc/ (дата звернення: 03.04.2026)
14. Трипозиційний перемикач навантаження URL:
https://enext.ua/catalog/vimikachi_navantazhennya_is/vimikach_na_din_reyku_na_tri_polozhennya_e_is3_pro_1_63_1r_63a/ (дата звернення: 03.04.2026)
15. Запобіжник плавкий URL:
https://enext.ua/uk/catalog/zapobizhniki_utrimuvachi_fuse/zapobizhnik_plavkiy_e_fuse_1038_20_tiporozmir_10kh38_20a/ (дата звернення: 03.04.2026)
16. Утримувач запобіжника URL:
https://enext.ua/catalog/utrimuvachi_zapobizhnikiv_fuse/utrimuvach_zapobizhnik_na_din_reyku_e_fuse_1038_h2_pid_zapobizhnik_10kh38_2r_32a/ (дата звернення: 03.04.2026)
17. Розетка Shelly Plug S MTR Gen3 URL: <https://kb.shelly.cloud/knowledge-base/shelly-plug-s-mtr-gen3> (дата звернення: 03.04.2026)
18. Автоматичний двополюсний вимикач 150А постійного струму для акумулятора URL: <https://rozetka.com.ua/ua/468119554/p468119554/> (дата звернення: 25.04.2026)
19. Суперконденсатор KR-5R5H105-R URL:
<https://www.kosmodrom.ua/ionistor-2/kr-5r5h105-r.html> (дата звернення: 25.04.2026)

ДОДАТКИ

Додаток А

Програмне забезпечення EMS-мікроконтролера «NUCLEO-H563ZI»

```
#include "main.h"
#include "lwip.h"
#include "lwip/sockets.h"
#include "lwip/inet.h"
#include <stdbool.h>
#include <stdint.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>

/* ----- Налаштування пінів і параметрів ----- */

#define BTN_ECO_GPIO_Port      GPIOC
#define BTN_ECO_Pin            GPIO_PIN_13
#define BTN_BLACKOUT_GPIO_Port  GPIOE
#define BTN_BLACKOUT_Pin       GPIO_PIN_3
#define LED_ECO_GPIO_Port      GPIOF
#define LED_ECO_Pin            GPIO_PIN_4
#define LED_BLACKOUT_GPIO_Port  GPIOG
#define LED_BLACKOUT_Pin       GPIO_PIN_4
#define BUTTON_ACTIVE_LEVEL     GPIO_PIN_RESET
#define SOC_CUTOFF_PERCENT      20U
#define SOC_PRIORITY2_OFF_PERCENT 40U
#define SOC_PRIORITY2_RESTORE_PERCENT 60U
#define SMART_PLUG_AUTO_RESTORE 1U
#define BLACKOUT_ALLOW_AC_CHARGE 1U
#define INVERTER_POLL_PERIOD_MS 5000U
#define BUTTON_DEBOUNCE_MS      40U
#define MODE_APPLY_MIN_GAP_MS    1500U
#define SHELLY_INTER_COMMAND_DELAY_MS 150U
#define UART_RX_TIMEOUT_MS       1800U
#define UART_TX_TIMEOUT_MS       1000U
```



```

#define NIGHT_START_HOUR      23U
#define NIGHT_END_HOUR        7U
#define RTC_DEFAULT_YEAR      25U
#define RTC_DEFAULT_MONTH      RTC_MONTH_JANUARY
#define RTC_DEFAULT_DATE       1U
#define RTC_DEFAULT_WEEKDAY    RTC_WEEKDAY_WEDNESDAY
#define RTC_DEFAULT_HOUR       12U
#define RTC_DEFAULT_MINUTE     0U
#define RTC_DEFAULT_SECOND     0U
#define RTC_MAGIC_WORD         0xA5A55A5AU /* це маркер записується в backup
register RTC, щоб програма зрозуміла, чи годинник уже був ініціалізований раніше. */
#define SHELLY_HTTP_PORT       80
#define SHELLY_HTTP_TIMEOUT_SEC 2
#define SHELLY_PLUG_COUNT      6U
static const char *SHELLY_PLUG_IPS[SHELLY_PLUG_COUNT] = {
    "192.168.1.101", /* Комп'ютер */
    "192.168.1.102", /* Мікрохвильова піч */
    "192.168.1.103", /* Зарядний пристрій 1 */
    "192.168.1.104", /* Зарядний пристрій 2 */
    "192.168.1.105", /* Зарядний пристрій 3 */
    "192.168.1.106" /* Телевізор */
};
/* ----- Типи даних ----- */
typedef enum
{
    EMS_MODE_ECONOMY = 0,
    EMS_MODE_BLACKOUT = 1
} EmsMode;
typedef enum
{
    AXPERT_OUTPUT_UTILITY_FIRST = 0,
    AXPERT_OUTPUT_SOLAR_FIRST  = 1,
    AXPERT_OUTPUT_SBU_FIRST    = 2
} AxpertOutputPriority;

```

```
typedef enum
```

```
{
    AXPERT_CHARGER_UTILITY_FIRST = 0,
    AXPERT_CHARGER_SOLAR_FIRST  = 1,
    AXPERT_CHARGER_SOLAR_UTILITY = 2,
    AXPERT_CHARGER_SOLAR_ONLY   = 3
} AxpertChargerPriority;
```

```
typedef enum
```

```
{
    AXPERT_MODE_POWER_ON = 'P',
    AXPERT_MODE_STANDBY  = 'S',
    AXPERT_MODE_LINE     = 'L',
    AXPERT_MODE_BATTERY  = 'B',
    AXPERT_MODE_FAULT    = 'F',
    AXPERT_MODE_HIBERN   = 'H'
} AxpertModeCode;
```

```
typedef struct
```

```
{
    float grid_voltage;
    float grid_frequency;
    float ac_out_voltage;
    float ac_out_frequency;
    uint16_t ac_out_va;
    uint16_t ac_out_w;
    uint16_t load_percent;
    uint16_t bus_voltage;
    float battery_voltage;
    uint16_t battery_charge_current;
    uint8_t battery_capacity;
    int16_t heatsink_temp;
    uint16_t pv_charge_current;
    float pv_input_voltage;
    float batt_voltage_from_scc;
    uint32_t battery_discharge_current;
    uint8_t inverter_status_bits;
```

```

uint16_t pv_charging_power;
uint8_t extra_status_bits;
} AxpertQpigsData;
typedef struct
{
    bool inverter_fault;
    bool line_fail;
    bool battery_low_alarm;
    bool battery_under_shutdown;
    bool overload;
    bool pv_voltage_high;
    bool battery_too_low_to_charge;
} AxpertWarnings;
typedef struct
{
    EmsMode selected_mode;
    EmsMode applied_mode;
    uint8_t soc_percent;
    bool grid_present;
    bool night_tariff_active;
    bool priority2_enabled;
    AxpertOutputPriority applied_output_priority;
    AxpertChargerPriority applied_charger_priority;
    uint32_t last_poll_tick;
    uint32_t last_mode_apply_tick;
    GPIO_PinState eco_btn_last_raw;
    GPIO_PinState eco_btn_stable;
    uint32_t eco_btn_last_change_tick;
    GPIO_PinState blackout_btn_last_raw;
    GPIO_PinState blackout_btn_stable;
    uint32_t blackout_btn_last_change_tick;
} EmsContext;
/* ----- Глобальні змінні HAL ----- */
UART_HandleTypeDef huart3;
RTC_HandleTypeDef hrtc;

```

```

ETH_HandleTypeDef heth;

static EmsContext g_ems;

/* ----- Прототипи ініціалізації CubeMX -----

void SystemClock_Config(void);
static void MX_GPIO_Init(void);
static void MX_USART3_UART_Init(void);
static void MX_RTC_Init(void);

/* ----- Прототипи внутрішніх функцій ----- */

static void EMS_Init(void);
static void EMS_Process(void);
static void EMS_LoadDefaultRtcIfNeeded(void);
static uint8_t EMS_GetHour(void);
static bool EMS_IsNightTariffActive(void);
static void EMS_UpdateLeds(void);
static void EMS_HandleButton(GPIO_TypeDef *port,
                             uint16_t pin,
                             GPIO_PinState *raw_last,
                             GPIO_PinState *stable,
                             uint32_t *last_change_tick,
                             EmsMode mode_to_set);

static bool EMS_ApplyOutputPriority(AxpertOutputPriority priority);
static bool EMS_ApplyChargerPriority(AxpertChargerPriority priority);
static void EMS_UpdatePriority2Sockets(void);
static void EMS_EconomyModeLogic(void);
static void EMS_BlackoutModeLogic(void);
static void EMS_PollInverter(void);
static bool Shelly_SetSwitchState(const char *ip, bool turn_on);
static bool Shelly_SetAllPriority2(bool turn_on);
static bool Axpert_Init(void);
static bool Axpert_QueryMode(AxpertModeCode *mode_out);
static bool Axpert_QueryWarnings(AxpertWarnings *warnings_out);
static bool Axpert_QueryQpigs(AxpertQpigsData *data_out);
static bool Axpert_SetOutputPriority(AxpertOutputPriority priority);
static bool Axpert_SetChargerPriority(AxpertChargerPriority priority);

/* ----- main ----- */

```

```

int main(void)
{
    HAL_Init();
    SystemClock_Config();
    MX_GPIO_Init();
    MX_USART3_UART_Init();
    MX_RTC_Init();
    MX_LWIP_Init();
    EMS_Init();
    while (1)
    {
        MX_LWIP_Process();
        EMS_Process();
    }
}

/* ----- RTC ----- */

static void EMS_LoadDefaultRtcIfNeeded(void)
{
    if (HAL_RTCEx_BKUPRead(&hrtc, RTC_BKP_DR1) == RTC_MAGIC_WORD)
    {
        return;
    }

    RTC_TimeTypeDef sTime = {0};
    RTC_DateTypeDef sDate = {0};
    sTime.Hours = RTC_DEFAULT_HOUR;
    sTime.Minutes = RTC_DEFAULT_MINUTE;
    sTime.Seconds = RTC_DEFAULT_SECOND;
    sTime.DayLightSaving = RTC_DAYLIGHTSAVING_NONE;
    sTime.StoreOperation = RTC_STOREOPERATION_RESET;
    sDate.WeekDay = RTC_DEFAULT_WEEKDAY;
    sDate.Month = RTC_DEFAULT_MONTH;
    sDate.Date = RTC_DEFAULT_DATE;
    sDate.Year = RTC_DEFAULT_YEAR;
    HAL_RTC_SetTime(&hrtc, &sTime, RTC_FORMAT_BIN);
    HAL_RTC_SetDate(&hrtc, &sDate, RTC_FORMAT_BIN);
}

```

```

    HAL_RTCEx_BKUPWrite(&hrtc, RTC_BKP_DR1, RTC_MAGIC_WORD);
}

static uint8_t EMS_GetHour(void)
{
    RTC_TimeTypeDef sTime = {0};
    RTC_DateTypeDef sDate = {0};
    HAL_RTC_GetTime(&hrtc, &sTime, RTC_FORMAT_BIN);
    HAL_RTC_GetDate(&hrtc, &sDate, RTC_FORMAT_BIN);
    return sTime.Hours;
}

static bool EMS_IsNightTariffActive(void)
{
    uint8_t hour = EMS_GetHour();
    if (NIGHT_START_HOUR > NIGHT_END_HOUR)
    {
        return ((hour >= NIGHT_START_HOUR) || (hour < NIGHT_END_HOUR));
    }
    else
    {
        return ((hour >= NIGHT_START_HOUR) && (hour < NIGHT_END_HOUR));
    }
}

/* ----- Shelly ----- */

static bool Shelly_SetSwitchState(const char *ip, bool turn_on)
{
    int sock = -1;
    bool ok = false;
    struct sockaddr_in server_addr;
    char request[256] = {0};
    char response[192] = {0};
    memset(&server_addr, 0, sizeof(server_addr));
    server_addr.sin_family = AF_INET;
    server_addr.sin_port = htons(SHELLY_HTTP_PORT);
    server_addr.sin_addr.s_addr = inet_addr(ip);
    sock = lwip_socket(AF_INET, SOCK_STREAM, 0);

```

```

if (sock < 0)
{
    return false;
}
struct timeval tv;
tv.tv_sec = SHELLY_HTTP_TIMEOUT_SEC;
tv.tv_usec = 0;
lwip_setsockopt(sock, SOL_SOCKET, SO_RCVTIMEO, &tv, sizeof(tv));
lwip_setsockopt(sock, SOL_SOCKET, SO_SNDTIMEO, &tv, sizeof(tv));
if (lwip_connect(sock, (struct sockaddr *)&server_addr, sizeof(server_addr)) != 0)
{
    goto cleanup;
}
snprintf(request, sizeof(request),
    "GET /relay/0?turn=%s HTTP/1.1\r\n"
    "Host: %s\r\n"
    "Connection: close\r\n\r\n",
    turn_on ? "on" : "off", ip);
if (lwip_send(sock, request, strlen(request), 0) < 0)
{
    goto cleanup;
}
int rx_len = lwip_recv(sock, response, sizeof(response) - 1, 0);
if (rx_len > 0)
{
    response[rx_len] = '\0';
    if (strstr(response, "200 OK") != NULL)
    {
        ok = true;
    }
}
cleanup:
if (sock >= 0)
{
    lwip_close(sock);
}

```

```

    }
    return ok;
}

static bool Shelly_SetAllPriority2(bool turn_on)
{
    bool all_ok = true;
    for (uint32_t i = 0; i < SHELLY_PLUG_COUNT; i++)
    {
        if (!Shelly_SetSwitchState(SHELLY_PLUG_IPS[i], turn_on))
        {
            all_ok = false;
        }
        HAL_Delay(SHELLY_INTER_COMMAND_DELAY_MS);
    }
    return all_ok;
}

/* ----- Axpert RS232 ----- */

static uint16_t Axpert_Crc16(const uint8_t *data, size_t len)
{
    uint16_t crc = 0;
    for (size_t i = 0; i < len; i++)
    {
        crc ^= ((uint16_t)data[i] << 8);
        for (uint8_t j = 0; j < 8; j++)
        {
            if (crc & 0x8000U)
            {
                crc = (uint16_t)((crc << 1) ^ 0x1021U);
            }
            else
            {
                crc <<= 1;
            }
        }
    }
}

```



```

    return crc;
}

static void Axpert_SanitizeCrcBytes(uint8_t *hi, uint8_t *lo)
{
    if ((*hi == 0x28U) || (*hi == 0x0DU) || (*hi == 0x0AU))
    {
        (*hi)++;
    }
    if ((*lo == 0x28U) || (*lo == 0x0DU) || (*lo == 0x0AU))
    {
        (*lo)++;
    }
}

static size_t Axpert_BuildCommand(const char *ascii_cmd, uint8_t *out_buf, size_t out_size)
{
    size_t n = strlen(ascii_cmd);
    if (out_size < (n + 3U))
    {
        return 0U;
    }
    memcpy(out_buf, ascii_cmd, n);
    uint16_t crc = Axpert_Crc16((const uint8_t *)ascii_cmd, n);
    uint8_t crc_hi = (uint8_t)((crc >> 8) & 0xFFU);
    uint8_t crc_lo = (uint8_t)(crc & 0xFFU);

    Axpert_SanitizeCrcBytes(&crc_hi, &crc_lo);
    out_buf[n++] = crc_hi;
    out_buf[n++] = crc_lo;
    out_buf[n++] = '\r';
    return n;
}

static bool Axpert_ReadResponse(uint8_t *rx_buf, size_t rx_size, size_t *rx_len)
{
    size_t idx = 0;
    uint8_t ch = 0;

```

```

while (idx < rx_size)
{
    if (HAL_UART_Receive(&huart3, &ch, 1, UART_RX_TIMEOUT_MS) != HAL_OK)
    {
        return false;
    }
    rx_buf[idx++] = ch;
    if (ch == '\r')
    {
        *rx_len = idx;
        return true;
    }
}
return false;
}

static bool Aexpert_SendAndReceive(const char *cmd_ascii, char *payload_out, size_t
payload_size)
{
    uint8_t tx[32] = {0};
    uint8_t rx[160] = {0};
    size_t tx_len = 0;
    size_t rx_len = 0;
    tx_len = Aexpert_BuildCommand(cmd_ascii, tx, sizeof(tx));
    if (tx_len == 0U)
    {
        return false;
    }
    __HAL_UART_FLUSH_DRREGISTER(&huart3);
    if (HAL_UART_Transmit(&huart3, tx, (uint16_t)tx_len, UART_TX_TIMEOUT_MS) !=
HAL_OK)
    {
        return false;
    }
    if (!Aexpert_ReadResponse(rx, sizeof(rx), &rx_len))
    {
        return false;
    }
}

```

```

    }
    if (rx_len < 4U)
    {
        return false;
    }
    size_t payload_len = rx_len - 3U;
    if (payload_len >= payload_size)
    {
        return false;
    }
    memcpy(payload_out, rx, payload_len);
    payload_out[payload_len] = '\0';
    return true;
}

static bool Axpert_IsAck(const char *payload)
{
    return (strncmp(payload, "(ACK", 4U) == 0);
}

static bool Axpert_SendSetCommand(const char *cmd_ascii)
{
    char payload[32] = {0};
    if (!Axpert_SendAndReceive(cmd_ascii, payload, sizeof(payload)))
    {
        return false;
    }
    return Axpert_IsAck(payload);
}

static bool Axpert_Init(void)
{
    return true;
}

static bool Axpert_QueryMode(AxpertModeCode *mode_out)
{
    char payload[32] = {0};
    if (!Axpert_SendAndReceive("QMOD", payload, sizeof(payload)))

```

```

{
    return false;
}
if (payload[0] != '(' || payload[1] == '\0')
{
    return false;
}
*mode_out = (AxpertModeCode)payload[1];
return true;
}

static bool Axpert_QueryWarnings(AxpertWarnings *warnings_out)
{
    char payload[80] = {0};
    if (!Axpert_SendAndReceive("QPIWS", payload, sizeof(payload)))
    {
        return false;
    }
    if (payload[0] != '(')
    {
        return false;
    }
    const char *bits = &payload[1];
    warnings_out->inverter_fault      = (bits[1] == '1');
    warnings_out->line_fail            = (bits[5] == '1');
    warnings_out->battery_low_alarm    = (bits[12] == '1');
    warnings_out->battery_under_shutdown = (bits[14] == '1');
    warnings_out->overload              = (bits[16] == '1');
    warnings_out->pv_voltage_high      = (bits[26] == '1');
    warnings_out->battery_too_low_to_charge = (bits[29] == '1');
    return true;
}

static bool Axpert_QueryQpigs(AxpertQpigsData *data_out)
{
    char payload[160] = {0};
    char parse_buf[160] = {0};

```

```

char *token = NULL;
char *saveptr = NULL;
uint32_t token_index = 0;
if (!Axpert_SendAndReceive("QPIGS", payload, sizeof(payload)))
{
    return false;
}
if (payload[0] != '(')
{
    return false;
}
strncpy(parse_buf, payload + 1, sizeof(parse_buf) - 1U);
token = strtok_r(parse_buf, " ", &saveptr);
while (token != NULL)
{
    switch (token_index)
    {
        case 0: data_out->grid_voltage      = strtod(token, NULL); break;
        case 1: data_out->grid_frequency    = strtod(token, NULL); break;
        case 2: data_out->ac_out_voltage    = strtod(token, NULL); break;
        case 3: data_out->ac_out_frequency  = strtod(token, NULL); break;
        case 4: data_out->ac_out_va         = (uint16_t)atoi(token); break;
        case 5: data_out->ac_out_w          = (uint16_t)atoi(token); break;
        case 6: data_out->load_percent       = (uint16_t)atoi(token); break;
        case 7: data_out->bus_voltage        = (uint16_t)atoi(token); break;
        case 8: data_out->battery_voltage    = strtod(token, NULL); break;
        case 9: data_out->battery_charge_current = (uint16_t)atoi(token); break;
        case 10: data_out->battery_capacity   = (uint8_t)atoi(token); break;
        case 11: data_out->heatsink_temp     = (int16_t)atoi(token); break;
        case 12: data_out->pv_charge_current  = (uint16_t)atoi(token); break;
        case 13: data_out->pv_input_voltage   = strtod(token, NULL); break;
        case 14: data_out->batt_voltage_from_scc = strtod(token, NULL); break;
        case 15: data_out->battery_discharge_current = (uint32_t)strtoul(token, NULL, 10);
break;
        case 16: data_out->inverter_status_bits = (uint8_t)strtoul(token, NULL, 2); break;
        case 19: data_out->pv_charging_power   = (uint16_t)atoi(token); break;
    }
}

```

```

        case 20: data_out->extra_status_bits      = (uint8_t)strtoul(token, NULL, 2); break;
        default: break;
    }
    token_index++;
    token = strtok_r(NULL, " ", &saveptr);
}
return (token_index >= 11U);
}

static bool Axpert_SetOutputPriority(AxpertOutputPriority priority)
{
    char cmd[16] = {0};
    snprintf(cmd, sizeof(cmd), "POP%02u", (unsigned int)priority);
    return Axpert_SendSetCommand(cmd);
}

static bool Axpert_SetChargerPriority(AxpertChargerPriority priority)
{
    char cmd[16] = {0};
    snprintf(cmd, sizeof(cmd), "PCP%02u", (unsigned int)priority);
    return Axpert_SendSetCommand(cmd);
}

/* ----- EMS ----- */
static void EMS_UpdateLeds(void)
{
    HAL_GPIO_WritePin(LED_ECO_GPIO_Port, LED_ECO_Pin,
        (g_ems.selected_mode == EMS_MODE_ECONOMY) ? GPIO_PIN_SET :
        GPIO_PIN_RESET);
    HAL_GPIO_WritePin(LED_BLACKOUT_GPIO_Port, LED_BLACKOUT_Pin,
        (g_ems.selected_mode == EMS_MODE_BLACKOUT) ? GPIO_PIN_SET :
        GPIO_PIN_RESET);
}

static void EMS_HandleButton(GPIO_TypeDef *port,
    uint16_t pin,
    GPIO_PinState *raw_last,
    GPIO_PinState *stable,
    uint32_t *last_change_tick,
    EmsMode mode_to_set)

```

```

{
    GPIO_PinState raw_now = HAL_GPIO_ReadPin(port, pin);
    uint32_t now = HAL_GetTick();

    if (raw_now != *raw_last)
    {
        *raw_last = raw_now;
        *last_change_tick = now;
    }
    if ((now - *last_change_tick) >= BUTTON_DEBOUNCE_MS)
    {
        if ((*stable != raw_now) && (raw_now == BUTTON_ACTIVE_LEVEL))
        {
            *stable = raw_now;
            g_ems.selected_mode = mode_to_set;
            EMS_UpdateLeds();
        }
        else if ((raw_now != BUTTON_ACTIVE_LEVEL) && (*stable != raw_now))
        {
            *stable = raw_now;
        }
    }
}

static bool EMS_ApplyOutputPriority(AxpertOutputPriority priority)
{
    if (g_ems.applied_output_priority == priority)
    {
        return true;
    }
    if (!Axpert_SetOutputPriority(priority))
    {
        return false;
    }
    g_ems.applied_output_priority = priority;
    return true;
}

```

```

}

static bool EMS_ApplyChargerPriority(AxpertChargerPriority priority)
{
    if (g_ems.applied_charger_priority == priority)
    {
        return true;
    }
    if (!Axpert_SetChargerPriority(priority))
    {
        return false;
    }
    g_ems.applied_charger_priority = priority;
    return true;
}

static void EMS_UpdatePriority2Sockets(void)
{
    /*
    * 1) При SOC <= 40% вимикаємо 6 розеток другого пріоритету.
    * 2) Якщо мережа з'явилась -> одразу вмикаються назад.
    * 3) Якщо мережі немає -> повторне вмикання дозволяється лише при SOC >= 60%.
    */
    if (g_ems.soc_percent <= SOC_PRIORITY2_OFF_PERCENT)
    {
        if (g_ems.priority2_enabled)
        {
            Shelly_SetAllPriority2(false);
            g_ems.priority2_enabled = false;
        }
        return;
    }

    #if (SMART_PLUG_AUTO_RESTORE == 1)
        if (!g_ems.priority2_enabled)
        {
            if (g_ems.grid_present)
            {

```



```

        Shelly_SetAllPriority2(true);
        g_ems.priority2_enabled = true;
        return;
    }
    if (g_ems.soc_percent >= SOC_PRIORITY2_RESTORE_PERCENT)
    {
        Shelly_SetAllPriority2(true);
        g_ems.priority2_enabled = true;
    }
}

#endif

static void EMS_EconomyModeLogic(void)
{
    /*
    * Економ:
    * 23:00-07:00 -> мережа живить навантаження, мережа заряджає АКБ.
    * 07:00-23:00 -> навантаження від PV/АКБ, заряд від мережі заборонений.
    * Якщо SOC <= 20% -> навантаження переводить на мережу до 23:00.
    */
    if (g_ems.night_tariff_active)
    {
        EMS_ApplyOutputPriority(AXPERT_OUTPUT_UTILITY_FIRST);
        EMS_ApplyChargerPriority(AXPERT_CHARGER_UTILITY_FIRST);
        return;
    }
    if (g_ems.soc_percent > SOC_CUTOFF_PERCENT)
    {
        EMS_ApplyOutputPriority(AXPERT_OUTPUT_SBU_FIRST);
        EMS_ApplyChargerPriority(AXPERT_CHARGER_SOLAR_ONLY);
    }
    else
    {
        EMS_ApplyOutputPriority(AXPERT_OUTPUT_UTILITY_FIRST);
        EMS_ApplyChargerPriority(AXPERT_CHARGER_SOLAR_ONLY);
    }
}

```

```

    }
}

static void EMS_BlackoutModeLogic(void)
{
    /*
    * Блекаут:
    * поки мережа є -> навантаження живиться від мережі, АКБ зберігається як резерв.
    * якщо мережа зникла -> навантаження переходить на PV/АКБ.
    */
    if (g_ems.grid_present)
    {
        EMS_ApplyOutputPriority(AXPERT_OUTPUT_UTILITY_FIRST);

#ifdef BLACKOUT_ALLOW_AC_CHARGE == 1
        EMS_ApplyChargerPriority(AXPERT_CHARGER_SOLAR_UTILITY);
#else
        EMS_ApplyChargerPriority(AXPERT_CHARGER_SOLAR_ONLY);
#endif
        return;
    }
    EMS_ApplyOutputPriority(AXPERT_OUTPUT_SBU_FIRST);
    EMS_ApplyChargerPriority(AXPERT_CHARGER_SOLAR_ONLY);
}

static void EMS_PollInverter(void)
{
    AxpertQpigsData qpigs = {0};
    AxpertWarnings warnings = {0};
    if (Axpert_QueryQpigs(&qpigs))
    {
        g_ems.soc_percent = qpigs.battery_capacity;
    }
    if (Axpert_QueryWarnings(&warnings))
    {
        g_ems.grid_present = !warnings.line_fail;
    }
}

```

```

    }

    g_ems.night_tariff_active = EMS_IsNightTariffActive();
}

static void EMS_Init(void)
{
    memset(&g_ems, 0, sizeof(g_ems));
    EMS_LoadDefaultRtcIfNeeded();
    g_ems.selected_mode = EMS_MODE_ECONOMY;
    g_ems.applied_mode = EMS_MODE_ECONOMY;
    g_ems.priority2_enabled = true;
    g_ems.applied_output_priority = (AxpertOutputPriority)0xFF;
    g_ems.applied_charger_priority = (AxpertChargerPriority)0xFF;
    g_ems.eco_btn_last_raw = HAL_GPIO_ReadPin(BTN_ECO_GPIO_Port, BTN_ECO_Pin);
    g_ems.eco_btn_stable = g_ems.eco_btn_last_raw;
    g_ems.eco_btn_last_change_tick = HAL_GetTick();
    g_ems.blackout_btn_last_raw = HAL_GPIO_ReadPin(BTN_BLACKOUT_GPIO_Port,
    BTN_BLACKOUT_Pin);
    g_ems.blackout_btn_stable = g_ems.blackout_btn_last_raw;
    g_ems.blackout_btn_last_change_tick = HAL_GetTick();
    Axpert_Init();
    EMS_UpdateLeds();
}

static void EMS_Process(void)
{
    uint32_t now = HAL_GetTick();
    EMS_HandleButton(BTN_ECO_GPIO_Port, BTN_ECO_Pin,
        &g_ems.eco_btn_last_raw,
        &g_ems.eco_btn_stable,
        &g_ems.eco_btn_last_change_tick,
        EMS_MODE_ECONOMY);
    EMS_HandleButton(BTN_BLACKOUT_GPIO_Port, BTN_BLACKOUT_Pin,
        &g_ems.blackout_btn_last_raw,
        &g_ems.blackout_btn_stable,
        &g_ems.blackout_btn_last_change_tick,
        EMS_MODE_BLACKOUT);
    if ((now - g_ems.last_poll_tick) < INVERTER_POLL_PERIOD_MS)

```

```
{  
    return;  
}  
g_ems.last_poll_tick = now;  
EMS_PollInverter();  
EMS_UpdatePriority2Sockets();  
if ((now - g_ems.last_mode_apply_tick) < MODE_APPLY_MIN_GAP_MS)  
{  
    return;  
}  
g_ems.last_mode_apply_tick = now;  
if (g_ems.selected_mode == EMS_MODE_ECONOMY)  
{  
    EMS_EconomyModeLogic();  
}  
else  
{  
    EMS_BlackoutModeLogic();  
}  
g_ems.applied_mode = g_ems.selected_mode;  
}
```