

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

**Радіотехнічний факультет
Кафедра прикладної радіoeлектроніки**

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою
«Інтелектуальні технології радіoeлектронної техніки»
спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»**

на тему: «Автономна система електропостачання у разі відключення»

Виконав:
студент IV курсу, групи РЕ-22

Цапчук Єгор Віталійович

Керівник: Ст.викл. Сокольський С.О

Рецензент: Олійник Максим Віталійович, асист. каф. РТС

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

Студент _____

Київ — 2026 року

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	4
Вступ	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ	7
1.1. Стан проблеми енергетики в Україні	7
1.2. Класифікація систем резервного живлення	9
1.3. Умови порівняння аналогів.....	11
1.4. Огляд комерційних аналогів	14
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ТА ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ	23
2.1. Вибір та обґрунтування акумуляторної батареї.....	23
2.2. Вибір та обґрунтування інвертора	28
2.3. Вибір та обґрунтування стабілізатора напруги	38
2.4. Розрахунок силових ліній та вибір елементів захисту	41
2.5. Структурна схема системи.....	46
2.6. Інтеграція в квартирний розподільний щит.....	49
2.7. Модуль моніторингу та керування пріоритезацією навантажень	55
2.8. Тепловий аналіз системи.....	59
2.9. Розрахунок струмів короткого замикання та селективність захисту	60
2.10. Система заземлення та захисні заходи	62
2.11. Пожежна безпека системи	63
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РОБОТИ СИСТЕМИ.....	67

3.1. Класифікація режимів роботи.....	67
3.2. Режим нормальної роботи від мережі (M1, M2).....	69
3.3. Режим автономної роботи (M3).....	70
3.4. Режим відновлення після відключення (M4).....	72
3.5. Аналіз перехідних процесів.....	73
3.6. Аварійні режими та реакція системи.....	75
3.7. Імітаційне моделювання режимів розряду системи	78
ВИСНОВКИ	90
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	92
ДОДАТОК А.....	95
ДОДАТОК Б.....	97

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АВ	— автоматичний вимикач
АКБ	— акумуляторна батарея
АТС (Automatic Transfer Switch)	— пристрій автоматичного введення резерву
БЖ	— блок живлення
ВМС (BMS, Battery Management System)	— система керування батареєю
ДБЖ (UPS, Uninterruptible Power Supply)	— джерело безперебійного живлення
ДС (DC-DC)	— перетворювач постійної напруги в постійну
ЕМС	— електромагнітна сумісність
ЕС	— електрична система
ЗП	— зарядний пристрій
ІП	— імпульсний перетворювач
ККД	— коефіцієнт корисної дії
МК (MCU)	— мікроконтролер
МПП (MPPT, Maximum Power Point Tracking)	— алгоритм відстеження точки максимальної потужності сонячної панелі
ПЗ	— програмне забезпечення
ПК	— персональний комп'ютер
ПУЕ	— правила улаштування електроустановок
СВН	— система відновлення напруги
СЕС	— сонячна електростанція

ВСТУП

У ХХІ столітті енергетична стабільність стала критично важливою для України. Ця тенденція особливо гостро стала актуальною після початку повномасштабного вторгнення російської федерації у 2022 році. Внаслідок масштабних та систематичних пошкоджень критичної інфраструктури, країна зіткнулась з суттєвим дефіцитом електроенергії. Саме це підкреслює критичну важливість розробки та впровадження локальної системи резервного електропостачання.

Однак, необхідність адаптації до тривалих та непередбачуваних відключень створює нові виклики у сфері побуту. Відсутність стабільного живлення перешкоджає стабільній роботі критичних приладів, засобів зв'язку та водопостачання. Це суттєво ускладнює побут, особливо в умовах міста та його щільної забудови з багатоквартирними будинками.

Традиційні методи мають суттєві обмеження. У міських забудовах класичні генератори не можуть масово застосовуватись через жорсткі вимоги, високий рівень шуму та вихлопні гази. Звичайні ДБЖ зі свинцево-кислотними акумуляторами, у свою чергу мають малу ємність, довго заряджаються та швидко втрачають свої властивості, що робить їх неефективними під час блекаутів.

Станом на 2026 рік в Україні існують декілька рішень для забезпечення резервного живлення, серед яких найвідомішим є гібридні інвертори та зарядні станції – зокрема EcoFlow, Bluetti та Fossibot. Ці зарядні станції використовують сучасні літієві елементи та дозволяють жити побутову техніку. Водночас ці рішення мають свої недоліки: є закритою для модифікацій системами з високою вартістю, не дозволяють легко змінювати або масштабувати акумуляторні елементи. Крім того, їх не можна напряму інтегрувати у квартирний розподільний щит, що не дозволяє керувати окремими лініями споживачів.

Поєднання тривалих відключень із відсутністю доступного рішення, яке можна вбудувати безпосередньо у квартирну електромережу, і визначає актуальність роботи: створення ефективної, безпечної та керованої в

автоматичному режимі системи резервного живлення для умов багатоповерхової міської забудови залишається невирішеним практичним завданням.

Саме тому виникає потреба у створенні апаратної платформи для резервного електроживлення. У даній роботі буде реалізована модульна система на базі акумуляторів LiFePO₄, яка вбудовується безпосередньо в розподільний щит квартири. Це дозволяє зосередити управління на рівні автоматичних перемикачів без потреби у ручному перемиканні приладів. При переході на резервне живлення система за потреби автоматично відключає некритичні лінії, залишаючи живлення для критичних вузлів. Такий підхід забезпечує простоту інтеграції, безпеку та можливість масштабування.

Об'єктом дослідження є процеси енергозабезпечення житлових приміщень в умовах нестабільної роботи енергосистеми.

Предметом дослідження є методи побудови та алгоритми керування системою резервного електроживлення на основі акумуляторів LiFePO₄ з можливістю інтеграції у квартирний розподільний щит.

Метою роботи є розробка програмованого ядра керування та апаратної частини системи резервного живлення, яка аналізує стан мережі, запобігає надмірному розряду акумуляторів та надає користувачу інтерфейс для керування навантаженням.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення таких завдань:

- проаналізувати існуючі аналоги та стандарти безпеки;
- виконати розрахунок необхідної потужності та ємності системи для типової квартири;
- розробити структурну та принципову схеми пристрою;
- створити веб-дашборд для відображення поточного стану системи;
- реалізувати систему моніторингу даних з пристрою.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання її результатів для забезпечення стабільного електропостачання у квартирах багатоповерхової забудови та підвищення рівня енергонезалежності населення в умовах нестабільного енергопостачання.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

1.1. Стан проблеми енергетики в Україні

З початку повномасштабного вторгнення у 2022 році російська федерація систематично завдає масштабних ударів по критичній інфраструктурі України, зокрема по ТЕЦ, ТЕС, ГЕС та АЕС [1]. Найвищої інтенсивності ці удари досягають наприкінці осені — на початку зими, що збігається з періодом похолодання.

У цей період споживання електроенергії природно зростає, а систематичні атаки на генеруючі станції одночасно зменшують доступну потужність — у результаті в енергосистемі виникає дефіцит. На рис. 1.1 наведено структуру втрат генеруючих потужностей за типами електростанцій станом на кінець 2025 року.



Рисунок 1.1 — Графік зміни генеруючих потужностей 2022-2026 рр

Як видно з рис. 1.1, з лютого 2022 року було втрачено понад 60 % встановленої генеруючої потужності [1,2] — з 63,3 ГВт до 21,9 ГВт. Найсильніше постраждала ТЕС та ТЕЦ. Через настільки значне скорочення доступної генерації Укренерго було змушене запровадити графіки відключень

— інструмент примусового балансування системи [1] між обсягами виробленої та спожитої електроенергії.

Принцип балансування полягає в тому, що в електричній мережі обсяг споживання має дорівнювати обсягу генерації, бо енергія в мережі не накопичується. Цей баланс регулюється автоматично і виявляється у частоті струму, у нормі він має становити 50 Гц. Значне відхилення небезпечне і може спричинити колапс системи або «блекаут». Саме тому в умовах нестачі генерації Укренерго примусово зменшує споживання часткового відключення споживачів, заради збереження вцілівшої системи.

Через це в Україні з'явилося три види графіків:

- Графік погодинних відключень (ГПВ) — планове відключенням з попереднім інформуванням споживачів. Під нього потрапляють побутові споживачі та малий бізнес.

- Графік аварійних відключень (ГАВ) — застосовується раптово без попередження при раптовому дефіциті електроенергії, наприклад після удару по критичній інфраструктурі.

- Графік обмежених потужностей (ГОП) — графік для промислових і бізнес споживачів. Зменшує максимально дозовану потужність без відключень світла.

Усі споживачі областей поділені на 6 груп, а з 2024 поділена ще на підгрупи (1.1, 1.2, 1.3 – в сумі 12 підгруп). В звичайних умовах тривалість одного відключення становить від 2 до 4 годин, після чого подача світла відновлюється на 2-3 години. Однак під час впровадження ГАВ, відключення світла може досягати сумарно 16-20 годин на добу, таку ситуацію можна було спостерігати останні дві зими (2024-2025 та 2025-2026 років) [2].

Об'єкти критичної інфраструктури – лікарні, водоканали та насосні станції - живляться від окремих ліній та не підлягають графікам ГПВ та ГАВ.

Реальна тривалість відключень для побутового споживача у 2024-2026 рр. становить від 8 до 12 годин підряд [1],[2]. Це формує потребу у локальній автономній системі резервного живлення з часом роботи не менше 12 годин з

деякими випадками на «блекаут». Саме цей розрахунковий час було обрано для системи, що проєктується у даній роботі.

1.2. Класифікація систем резервного живлення

Системи резервного живлення можна класифікувати за кількома ознаками. Кожна з них вирішує свою задачу, хтось захищає комп'ютер від різкого відключення світла, а хтось забезпечує автономне живлення квартири на добу.

Найпростіший поділ – це те, звідки система бере енергію. Розглянемо три найпопулярніші типи:

Таблиця 1.1 — Типи систем за джерелом енергії

Тип системи	Джерело енергії
Паливні (генератори)	Бензин, дизель, газ
Акумуляторні системи (ДБЖ, портативні станції)	Хімічна енергія АКБ (Li-ion, LiFePO4, AGM, гель)
Гібридні	АКБ + ДВЗ або АКБ + сонячні панелі

На таблиці 1.1 ми бачимо паливні, акумуляторні та гібридні системи. Паливні системи працюють за рахунок двигуна внутрішнього згорання, він спалює бензин, дизель чи газ і обертає ротор електрогенератора. Його перевага: простота використання (залити паливо і все). Недоліки: шум, викиди, обмежений моторесурс та неможливість використання в міській забудові, зокрема – квартирі.

Акумуляторна система навпроти, не виробляє електроенергію, а витрачає її. Енергія заздалегідь запасена в батареї, а інвертор вже в свою чергу перетворює струм в 220-230 В. До цього класу можна віднести джерела безперебійного живлення, портативні станції, типу – EcoFlow, Fossibot та інші, а також стаціонарні системи накопичення електроенергії. Плюси: простота у використанні. Недоліки: не підходить для довготривалих відключень, пропрієтарність системи.

Гібридні системи є найпростішими у використанні та мають можливість інтеграції в розподільний щит. Їхні акумулятори миттєво зчитують відключення від мережі, та починають працювати. Це є їх одна з переваг таких систем, але є й головний недолік у порівнянні з іншими системами – ціна. Серед усіх наявних аналогів, гібридні системи є найдорожчими.

Таблиця 1.2 — Класифікація систем за потужністю

Клас	Потужність
Мікро	до 0,5 кВт
Малий	0,5–2 кВт
Середній	2–5 кВт
Великий побутовий	5–10 кВт
Промисловий	10+ кВт

На таблиці 1.2 ми бачимо розподілення за потужністю. Мікро зазвичай використовуються для живлення незначних пристроїв, таких як: роутер, освітлення та зарядка пристроїв.

Малий клас більш розповсюджений серед бюджетних варіантів. Він дає змогу жити вже такі пристрої та системи як: холодильник, телевізор, ноутбук та газові котли.

Середній клас вже дозволяє майже не звертати уваги на відключення. Він може спокійно жити – середньостатистичний комп'ютер, мікрохвильову піч та фен.

Великий побутовий клас вже використовується для живлення приватних домів з наявною електроплиткою, насосів свердловин та іншого.

Промисловий в свою чергу використовують для живлення офісів, магазинів та ферм.

Таблиця 1.3 — Види вихідних сигналів

Тип сигналу	Якість
Чиста синусоїда	Як у мережі
Модифікована синусоїда	Ступінчаста апроксимація
Прямокутна	Низька

На таблиці ми бачимо три типи вихідного сигналу. Чиста синусоїда – зазвичай сумісна з будь якою сучасною технікою, в тому числі котлами та електроплитками. Модифікована синусоїда – найкраще підходить до пристроїв з резистивним навантаженням та простими блоками живлення: зарядні пристрої, телевізори, обігрівачі та лампи розжарювання. Прямокутна – в наш час майже не зустрічається, але вона може жити найпростішу техніку без чутливих компонентів: кавоварки, тостери, роутери та подібне.

1.3. Умови порівняння аналогів

Для подальшого порівняння та розробки проекту необхідно визначити середовище в якому система буде використовуватись. В якості середовища обрано двокімнатну квартиру в багатоповерховій забудові, що відповідає більшій частині житла в Україні. Перелік побутових споживачів що мають працювати під час відключень світла наведені в таблиці 1.4 нижче:

Таблиця 1.4 — Таблиця споживачі

Споживач	Номінальна потужність $P_{\text{ном}}$, Вт	Коефіцієнт використання k_v	Час роботи троб, год	Спожита енергія E_i , Вт·год
Холодильник	150	0,35	12	630
Wi-Fi маршрутизатор	10	1,00	12	120
LED-освітлення (4·10 Вт)	40	0,50	6	120
Ігровий ноутбук	200	0,75	12	1800
Телевізор LED 43"	100	0.50	10	500
РАЗОМ	500			3170

Параметри які наведені в таблиці 1.4 відображають режим роботи кожного споживача та необхідні для розрахунку електричного навантаження двокімнатної квартири.

Номінальна потужність $P_{\text{ном}}$ – це потужність, яка зазначається у паспорті приладу. Це теоретичне значення максимального навантаження зазначене виробником.

Коефіцієнт використання k_v – це значення наведене для більш коректного розрахунку спожитої енергії. Цей коефіцієнт показує яку частку часу у більшості випадків працює споживач. Розраховується за формулою:

$$k_v = \frac{t_{\text{активне}}}{t_{\text{загальне}}} \quad (1.1)$$

Для приладів з безперервного живлення (Wi-Fi маршрутизатор або телевізор) $k_v = 1$; для приладів з циклічною роботою або зі змінним режимом навантаження k_v приймає проміжне значення. Для холодильника $k_v < 1$, оскільки компресор працює лише частку часу.

Час роботи $t_{\text{роб}}$ – це тривалість, протягом якої прилад знаходиться у ввімкненому режимі роботи. У межах цього розрахунку було обрано одну годину, тобто визначається середньогодинне споживання енергії під час роботи усіх пристроїв.

Спожита енергія E_n – кількість електричної енергії, спожитої приладом за певний час. Це величина, яка є результатом розрахунків і використовується у подальшому для визначення сумарного навантаження та необхідної ємності акумуляторної батареї.

Значення коефіцієнтів використання прийнято відповідно до рекомендацій ДБН В.2.5-23:2010 «Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення» [10] та усереднених статистичних даних щодо побутової техніки відповідного класу енергоефективності.

Формули розрахунку

Спожита енергія окремого n-споживача за певний час:

$$E_n = P_{\text{ном},n} \cdot k_{v,n} \cdot t_{\text{роб},n} \quad (1.2)$$

де $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність n -споживача; k_v – коефіцієнт використання n -споживача; $t_{\text{роб}}$ – тривалість роботи приладу за відзначений час.

Приклад розрахунку для ігрового ноутбука:

$$E_{\text{ноут}} = 200 \cdot 0.75 \cdot 12 = 1800 \text{ Вт} \cdot \text{год} \quad (1.3)$$

Загальне споживання електроенергії в квартирі за визначений час визначається як сума спожитої енергії всіх n споживачів:

$$E_{\text{заг}} = \sum E_n \quad (1.4)$$

Підставляючи значення отримуємо:

$$E_{\text{заг}} = 630 + 120 + 120 + 1800 + 500 = 3170 \text{ Вт} \cdot \text{год} \quad (1.5)$$

Сума номінальних потужностей споживачів характеризує максимально можливе одночасне навантаження за умови, що всі прилади працюють на повну потужність:

$$\sum P_{\text{ном}} = \sum P_{\text{ном}, n} = 500 \text{ Вт} \quad (1.6)$$

В реальних умовах одночасна робота всіх споживачів на повну потужність є малоімовірною. Тому пікове розрахункове навантаження визначається з урахуванням коефіцієнту одночасності:

$$P_{\text{пik}} = k_o \cdot \sum P_{\text{ном}} \quad (1.7)$$

де k_o – коефіцієнт одночасності, що для двокімнатної квартири приймаємо за 0.7 згідно з ДБН В.2.5-23:2010 [10].

$$P_{\text{пik}} = 0.7 \cdot 500 = 350 \text{ Вт} \quad (1.8)$$

З урахуванням пускового струму компресора холодильника, який в момент запуску в 3 рази перевищує номінальний:

$$P_{\text{пуск}} = P_{\text{пik}} - P_{\text{хол}} + P_{\text{хол}} \cdot k_{\text{пуск}} \quad (1.9)$$

де $k_{\text{пуск}}$ — коефіцієнт пускового струму електродвигуна (для асинхронних компресорів холодильників приймається 3).

$$P_{\text{пуск}} = 350 - 150 + 150 \cdot 3 = 650 \text{ Вт} \quad (1.10)$$

Необхідна ємність акумуляторної батареї визначається виходячи з умови забезпечення живлення розрахункового навантаження протягом часу автономної роботи системи:

$$C_{\text{акб}} = \frac{E_{\text{заг}}}{(\eta_{\text{інв}} \cdot DoD \cdot U_{\text{ном}})} \quad (1.11)$$

де $\eta_{\text{інв}}$ – ккд інвертору для сучасних інверторів з чистою синусоїдою = 0.92; DoD – допустима глибина розряду акумуляторної батареї, для LiFePO4 приймається як – 0.8; $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга батарейної збірки (для LiFePO4 - 51.2 В)

$$C_{\text{акб}} = \frac{3170}{(0.92 \cdot 0.8 \cdot 51.2)} \approx 84.1 \text{ А} \cdot \text{год} \quad (1.12)$$

У результаті проведеного розрахунку визначено основні енергетичні характеристики еталонного навантаження двокімнатної квартири: загальне споживання енергії за 12-годинний автономний період — 3,17 кВт·год, сумарна паспортна потужність — 500 Вт, розрахункове пікове навантаження з урахуванням коефіцієнта одночасності — 350 Вт, пікове навантаження з урахуванням пускових режимів — 650 Вт. Розрахункова необхідна ємність акумуляторної батареї для забезпечення 12-годинного автономного режиму становить 84,1 А·год при напрузі збірки 51,2 В. З урахуванням запасу на природну деградацію батареї (близько 20% за 5 років експлуатації LiFePO4), можливе зниження ефективної ємності при низьких температурах та потенційне підключення додаткових споживачів обирається акумуляторна батарея стандартного номіналу 100 А·год (5,12 кВт·год), що забезпечує сумарний запас близько 19% від розрахункової потреби.

Отримані значення є вихідними даними для подальшого вибору компонентів системи, що розглянемо у наступному розділі.

1.4. Огляд комерційних аналогів

Сформульовані у розділі 1.3 розрахунки, дають нам змогу правильно підібрати аналоги на ринку України. Враховуючи допустиму глибину розряду акумуляторів типу $\approx 0.8-0.9$, фактична ємність має становити приблизно 4.5-5.0кВт·год – для забезпечення корисної ємності без передчасної деградації системи. Ці значення (4.0 кВт·год корисної ємності, 350 Вт сталої та 650 Вт для пускової потужності) будуть використовуватись як еталонні для оцінювання комерційних аналогів.

Для порівняння було обрано три типові категорії систем, які становлять основну частину систем резервного електропостачання на ринку в Україні: інверторні бензинові генератори, системи на базі свинцево-кислотних акумуляторів із зовнішнім інвертором та портативні станції з вбудованим інвертором. Як представників обрано вироби з найбільшим поширенням і достатнім періодом експлуатації для оцінки характеристик: інверторний бензиновий генератор Honda EU30i, інверторно-акумуляторну зв'язку Luxeon 1000 VA з акумулятором 100 А·год, а також літєві портативні станції EcoFlow Delta Pro Ultra, Bluetti AC500 з двома батареями B300K та Fossibot F3600 Pro. Зведений порівняльний аналіз за 15 параметрами наведено в таблиці 1.5

Таблиця 1.5 — Порівняння систем резервного живлення

Хар-тика	СВ акумулятор + інвертор	EcoFlow (Delta Pro Ultra)	Bluetti (AC500 + 2·B300K)	Fossibot (F3600 Pro)	Бензогенера тор (Honda EU30i)
Тип системи /призначення	Портативна станція з вбудованим інвертором	Модульна стаціонарна станція з вбудованим інвертором	Модульна станція: інвертор + зовнішні батареї	Портатив на електрост анція "все в одному"	ДВЗ- генератор на бензині
Номінальна потужність	1,5–2 кВт	7,2 кВт (АС, стабільні)	5 кВт (АС, пік 10 кВт)	3,6 кВт (АС, пік 7 кВт)	3–5 кВт
Ємність накопичувача	0,8–1,5 кВт·год (свинцево- кислотний АКБ)	6 кВт·год / блок (LiFePO ₄ , до 30 кВт·год з розширення м)	6,1 кВт·год (2·B300K LiFePO ₄ , до 18,4 кВт·год)	3,84 кВт·год (LiFePO ₄ вбудована)	Немає (паливний бак ~5–7 л)

Продовження таблиці 1.5

Хар-тика	СВ акумулятор + інвертор	EcoFlow (Delta Pro Ultra)	Bluetti (AC500 + 2·B300K)	Fossibot (F3600 Pro)	Бензогенера тор (Honda EU30i)
Час авт. роботи	3–4 год (потрібно змінити 2–3 рази)	8–12 год (1 блок 6 кВт·год, на межі)	8–12 год (2 батареї = 6,1 кВт·год, на межі)	5–7 год (потрібно 2 блоки)	Так, але ~15 л бензину (3 заправки по 5 л)
Ресурс/термін служби	1–1,5 року активної експлуатації (деградація АКБ)	10–15 років (≈3500 циклів)	10–15 років (≈3500 циклів)	10 років (≈3000 циклів)	1–1,5 року при активному використанн і
Надійність	Низька	Висока	Висока	Середня– висока	Помірна (механічний знос, потребує ТО)
Якість вихідної напруги	Модифікова на/чиста синусоїда	Чиста синусоїда	Чиста синусоїда	Чиста синусоїда	нестабільна
Шум / викиди	Безшумний, без викидів	Безшумний, без викидів	Безшумний, без викидів	Безшумни й, без викидів	Гучний, вихлопні гази — лише вулиця
Поточні витрати	Тариф на електроенерг ію + заміна АКБ	Тариф на електроенер гію	Тариф на електроенер гію	Тариф на електроен ергію	Пальне + мастило + ТО

Продовження таблиці 1.5

Хар-тика	СВ акумулятор + інвертор	EcoFlow (Delta Pro Ultra)	Bluetti (AC500 + 2·B300K)	Fossibot (F3600 Pro)	Бензогенера тор (Honda EU30i)
Орієнтовна вартість	\$200–500	\$5 500–6 500 (1 блок Inverter + 1 Battery)	\$4 500–5 500 (AC500 + 2·B300K)	\$1 200–1 600	\$400–1 200
Відкритість до модернізації	Доступна, але обмежена	Модульна (до 5 акумуляторі в)	Модульна (до 6 батареї)	Закрита (немає розширен ня батареї)	Доступна, але без сенсу
Кількість одиниць для покриття 12 год	5–7 шт. (АКБ 100 А·год)	1 шт. (достатньо, на межі)	1 комплект (достатньо, з запасом)	2 шт. (для впевненог о покриття)	1 шт. + ~15 л пального
Вартість системи для 12 год відключення	\$1 000–2 000 (5–7 АКБ + інвертор)	\$5 500–8 000 (базовий комплект, 12 год на межі)	\$4 500–5 500 (базовий комплект, 12 год на межі)	\$2 400–3 200 (2 одиниці, 12 год з запасом)	\$400–1 200 + ~\$15/12 год (пальне)
Час повного заряду	8–12 год (від 220 В мережі)	1,7–2 год (5,6 кВт АС вхід)	1,5–2 год (Турбо- заряд 5 кВт АС)	1,5 год (2,2 кВт АС вхід)	Не має потреби (дозаправка пального)

Кінець таблиці 1.5

Хар-тика	СВ акумулятор + інвертор	EcoFlow (Delta Pro Ultra)	Bluetti (AC500 + 2-B300K)	Fossibot (F3600 Pro)	Бензогенера тор (Honda EU30i)
Загальна оцінка для домогосподарства	Бюджетне короткостро кове рішення	Преміум готове рішення, дорого	Якісна модульна альтернатив а EcoFlow	Найкраще співвідно шення ціна/якіст ь	Резерв для тривалих відключень, але шум/викиди/ ТО

Розглянемо відповідність кожного з аналогів вимогам, сформульованим за результатами розрахунків з розділу 1.3.

СВ акумулятор з інвертором (Luxeon 1000 VA+ АКБ 100 А/год) – Корисна ємність одного такого акумулятору при напрузі в 12 В і допустимій глибині розряду 50% становить десь 0.6 кВт·год. Головною перевагою цього варіанту систем є низький поріг вартості, базовий комплект інвертору з одним АКБ коштуватиме приблизно 9000-15000 гривень (200-400 доларів США). Інвертор Luxeon 1000 VA з номінальною потужністю в 1.5-2 кВт з великим запасом перекидає раніше розраховане пускове навантаження в 650 Вт, тож проблем із компресором холодильника або з живленням інших споживачів не виникає, також великим плюсом є використання стандартним для сервісних центрів компонентами, що робить заміну окремих елементів доступним. Разом з цим обсяг накопиченої енергії є слабким місцем цього класу: щоб забезпечити розраховані 4 кВт·год корисної енергії на 12 годин, потрібно встановити 6-7 таких акумуляторів, що у житловій квартирі зробити майже неможливо ні за габаритами, ні за вагою. До цього додається виділення водню під час заряджання свинцево-кислотних елементів у замкненому приміщенні. Також суттєвим недоліком є короткий ресурс системи – 1.5-2 роки активної експлуатації, після чого потрібна повна заміна всієї акумуляторної збірки, а ще тривалий час

заряджання усієї системи близько 8-12 годин, через який система не буде встигати відновитися за умови короткочасних появ світла.

EcoFlow Delta Pro Ultra – базова конфігурація системи має корисну ємність в 6 кВт·год – це головна перевага станції: вона перевищує розраховану потребу у 4 кВт·год із запасом близько 50%, що дозволяє пережити відключення більше ніж 12 годин без переходу до критичного розряду. Номінальна потужність в 7.2 кВт перевищує пускове навантаження в 650 Вт більш ніж у десять разів, тож живлення наших пристроїв взагалі не буде створювати проблеми. Перевагою станції від цієї фірми є чиста синусоїда на виході, термін служби в 10-15 років (3500 циклів) активного використання та швидкий заряд 1.7-2 год. Модульна архітектура станції з можливістю нарощування ємності до 30 кВт·год. Основними недоліками є дуже висока вартість базового комплекту - 5000-8000 доларів США це унеможливорює купівлю цієї системи для більшості людей. Іншим недоліком є закритість архітектури для зміни окремого елементу системи або модернізування станції власноруч. Окремим недоліком станції від EcoFlow для розглянутого сценарію є неможливість інтеграції безпосередньо в квартирний щит без додаткового обладнання; станція розрахована на мобільне використання з підключенням напряму до її розеток.

Bluetti AC500 з двома батареями B300K – перевагою комплекту є сумарна корисна ємність 6,1 кВт·год, що так само з запасом близько 50% перекидає розраховані 4 кВт·год і зможе витримати відключення в більше ніж 12 годин. Важливою перевагою порівняно з EcoFlow ж модульна архітектура на рівні зовнішніх батарей, користувач може за потреби додавати блоки B300K і нарощувати ємність до 18.4 кВт·год не змінюючи інвертор. До переваг також належать нижча за EcoFlow аналогічного класу вартість 4500–5500 доларів США, чиста синусоїда на виході, ресурс батарей 3500 циклів (10-15 років роботи) та швидкий заряд за 1,5–2 години в режимі Turbo-charge. Однак недоліком залишається все ще висока вартість комплекту для сценарію двокімнатної квартири. Окремим недоліком є переплата за не використану потужність, номінальні 5 кВт і пікові 10 кВт у 8 і більше разів вище за

розраховане пускове навантаження в 650 Вт. Також модульність системи стосується тільки зовнішніх акумуляторних блоків, заміна окремих компонентів усередині залишається недоступною, а інтеграція безпосередньо у квартирний розподільний щит без додаткових вузлів, як і у випадку EcoFlow, не передбачена.

Fossibot F3600 Pro – головною перевагою Fossibot у класі портативних систем є співвідношення ціна/якість – 1200-1600 доларів США за блок, що у декілька разів менше за аналоги EcoFlow та Bluetti при близьких споживчих характеристиках. Номінальна потужність у 3.6 кВт і пікова в 7 кВт з великим запасом перекривають пускове навантаження в 650 Вт. До переваг також належить чиста синусоїда, ресурс в приблизно 3000 циклів (10 років експлуатації) та швидший серед розглянутих аналогів час заряджання – 1.5 години. Основним недоліком же є вбудована ємність в 3.84 кВт·год, вона трохи менше за розраховану у 4 кВт·год, внаслідок чого один блок забезпечує приблизно на 11-12 годин на межі допустимого розряду, без запасів. Невелике відхилення від розрахованих 4 кВт·год вже залишить квартиру без живлення, тож для покриття цього недоліку довелось би купувати два блоки, що подвоює вартість станції та фактично нівелює основну цінову перевагу. Не менш важливим недоліком є те, що виробник не передбачив зовнішнє розширення ємності – це різко обмежує гнучкість використання.

Бензиновий генератор Honda EU30i – перевагою генератора є найнижча серед потужних рішень початкова ціна – 400-1200 доларів США, за модель з номінальною потужністю у 3 кВт·год, що з великим запасом перекриває пускове навантаження. Головною перевагою паливної системи над акумуляторної є необмежений час автономної роботи за умови дозаправки бензином: від 12 годин так і до декількох діб поспіль. Генератор не потребує заряду та незалежний від мережі, що робить його ідеальним варіантом для довготривалих відключень або непланованих блекаутів. Серйозними недоліками експлуатації такої системи рівень шуму 70–95 дБ, який унеможливорює довготривалу роботу пристрою як для самих мешканців, так і для сусідів, а вихлопні гази, що містять чадний газ, унеможливають розміщення пристрою у замкнутому просторі що виключає

квартирні сценарії. Окремим недоліком можна виділити не стабільну якість вихідної напруги, що становить ризик для чуткої техніки - ноутбука, мережевого обладнання. Також мінусом є не довговічність – не більше 1-1.5 року при активному використанні.

Висновок до розділу 1. Аналіз стану енергосистеми України показав, що втрата понад 65% встановленої генеруючої потужності сформувала стійкий режим керованого дефіциту електроенергії, за якого тривалість відключень для побутових споживачів у 2024–2026 роках становить 8–12 годин на добу. Цей режим є системним і не може бути подолано на рівні індивідуального споживача без локального накопичувача енергії, що однозначно визначає клас технічних рішень, необхідних для забезпечення безперервного електропостачання квартири.

Розрахунок реального енергетичного навантаження двокімнатної квартири виявив принципову розбіжність між паспортними та ефективними характеристиками споживачів: застосування коефіцієнтів використання k_v та одночасності k_o дає значення ефективного добового споживання 3 170 Вт·год — майже вдвічі нижче від суми номінальних потужностей. Це свідчить про те, що проєктування ємності накопичувача за паспортними потужностями приладів систематично призводить до надмірного завищення вимог і невиправданого подорожчання системи.

Порівняльний аналіз комерційних аналогів за 15 параметрами підтвердив відсутність на ринку рішення, яке одночасно задовольняє критеріям достатньої корисної ємності ($\geq 4,0$ кВт·год), прямої інтеграції в квартирний розподільний щит та прийнятної для масового споживача вартості. Виявлена прогалина між параметрами і ціною наявних рішень є кількісно підтвердженою підставою для власної розробки.

Аналіз типів акумуляторів з позицій безпеки встановив, що в умовах житлового приміщення багатоповерхового будинку вибір хімії накопичувача є не питанням технічної переваги, а нормативною вимогою: виділення водню та ризик теплового розгону унеможливають ці технології без спеціалізованого

середовища, що однозначно визначає технологічну платформу ще на стадії технічного завдання.

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ТА ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ

На основі вимог, які сформульовані за результатами розрахунків у попередньому розділі, у цьому розділі буде здійснюватися вибір та обґрунтування основних апаратних компонентів проєктованої системи резервного електропостачання: інвертор, акумуляторна батарея та стабілізатор напруги. Розглядається принциповий підхід проєктування, за яким силові компоненти обираються з числа сертифікованих промислових виборів, а також виконується порівняльний аналіз двох можливих архітектурних підходів до побудови систем керування: інтегрованого, з вбудованим у силовий блок модулем моніторингу та керування, і модульного, з винесеним у окремий мікроконтролер.

Такий підхід поєднує переваги промислових компонентів з гнучкістю та функціональністю, недоступною у комерційних рішень, зокрема — інтелектуальне керування навантаженнями на рівні квартирної розподільної щита.

2.1. Вибір та обґрунтування акумуляторної батареї

Акумуляторна батарея є ключовим компонентом системи резервного електропостачання, який визначає енергетичну ємність, ресурс, габарити та значною мірою — вартість системи в цілому. Вибір типу та конкретної моделі батареї здійснюється на основі сформульованих у п. 1.3 та 1.4 розрахункових вимог та з урахуванням специфіки експлуатації у житловому приміщенні багатоповерхового будинку.

Сучасний ринок побутових систем накопичення енергії пропонує три основні типи акумуляторів: свинцево-кислотні, літій-іонні та літій-залізо-фосфатні. Порівняльні типи цих типів за основними характеристиками наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Порівняння типів акумуляторів для систем резервного живлення

Параметри	Свинцево-кислотні	Li-ion	LiFePO ₄
Питома енергія	30 - 40	150 - 220	90 - 120
Кількість Циклів	300 - 500	1 000 – 2 000	3 000 -6 000
ККД заряду-розряду	75 - 85	90 - 95	95 - 98
Робочій діапазон температур	Від -20 до +50	Від 0 до +45	Від -20 до +55
Орієнтовна вартість за 1 кВт·год	4 000 – 6 000 грн	9 000 – 13 000 грн	7 000 – 9 000 грн
Утилізація	Складна (свинець)	Дорога(кобальт)	Безпечна

Як видно з порівняння, свинцево-кислотні акумулятори характеризуються найнижчою ціною та найбільшим досвідом промислового використання, проте поступаються у всьому літій-іонним акумуляторам: питомою енергією, ресурсом та ККД. Крім того, виділення водню під час заряджання створює вибухонебезпеку, що вимагає обов'язкової вентиляції і робить свинцеві акумулятори малопридатними для встановлення у житлових приміщеннях без спеціально створеного середовища.

Акумулятори типу Li-ion мають найвищу питому енергію, що робить їх популярними у портативних електростанціях та електромобілях. Однак для стаціонарних побутових систем головним недоліком є схильність до теплового розгону при механічному пошкодженні, перезаряджанні або перегріві. Це створює серйозний ризик пожежі та робить такі батареї непридатними для розміщення у житлових приміщеннях без спеціального обладнання.

Літій-залізо-фосфатні акумулятори (LiFePO₄) є оптимальним рішенням для квартирних систем резервного живлення завдяки поєднанню експлуатаційних та безпекових характеристик. На відміну від Li-ion, який

містить кобальт і має менш стабільну хімічну структуру, LiFePO_4 не схильний до теплового розгону: за результатами випробувань за стандартами UL 1973 та ДСТУ ІЕС 62133 елементи LiFePO_4 не займаються навіть при наскрізному пробитті або механічних руйнувань корпусу [5,6]. Це робить даний тип акумуляторів єдиним прийнятним варіантом для розміщення накопичувача енергії у багатоповерховому житловому будинку без необхідності в спеціалізованому обладнанні.

Принциповим питанням при проектуванні є вибір між використанням готової промислової батареї та самостійним складанням збірки з окремих елементів LiFePO_4 . У межах цієї роботи було обрано готову промислову батарею, що обґрунтовується відповідністю нормативним вимогам (ДСТУ ІЕС 62133:2017 щодо безпеки літєвих акумуляторів у житловому секторі) [6], наявністю заводського контролю якості та сертифікованої BMS промислового рівня, гарантійним обслуговуванням від виробника та відсутністю ризиків під час самостійної збірки.

На основі сформульованих вимог та проведеного аналізу ринку було обрано акумуляторну батарею Deye SE-G5.1 Pro-B (рисунок 2.1) виробництва компанії Ningbo Deye Inverter Technology Co. [7] – однієї з провідних компанії у галузі систем накопичення енергії з представництвом в Україні. Зіставлення розрахункових вимог до батареї та характеристик обраної моделі наведено у таблиці 2.2.



Рисунок 2.1 — Акумуляторна батарея Deye SE-G5.1 Pro-B

Таблиця 2.2 — Зіставлення розрахункових вимог з характеристиками батареї Deye SE-G5.1 Pro-B

Вимоги	Розрахункове значення	Параметр Deye SE-G5.1 Pro-B
Номінальна напруга збірки	51.2 В	51.2 В
Корисна ємність	Більше 2.9 кВт·год	4.6 кВт·год
Номінальна ємність	Більше 84.1 А·год	100 А/год
Безперервний струм розряду	Більше 30 А	100 А/год
Піковий струм розряду	Більше 45 А	150 А
Інтерфейс зв'язку з контролером	CAN 2.0 або RS485	CAN 2.0 RS485
Клас захисту корпусу	IP20 або краще	IP20
Ресурс	Більше 3 000 циклів	Більше 6000 циклів

Як видно з таблиці, обрана батарея із значним запасом задовольняє всі сформульовані технічні вимоги. Резерв за номінальною ємністю компенсує природну деградацію протягом тривалого використання, зниження ємності у холодний період, а також залишає простір для додаткових споживачів без переробки системи.

Таблиця 2.3 — Технічні характеристики батареї Deye SE-G5.1 Pro-B

Параметр	Значення
Хімія комірок	LiFePO ₄ (16S, без кобальту)
Номінальна напруга	51,2 В
Діапазон робочої напруги	44,8...57,6 В
Номінальна ємність	100 А·год

Продовження таблиці 2.3

Параметри	Значення
Загальна енергія	5,12 кВт·год
Корисна енергія (DoD 90%)	4,6 кВт·год
Безперервний струм розряду	100 А
Піковий струм розряду (2 хв)	150 А
Безперервний струм заряду	50 А
Ресурс	> 6 000 циклів
Робоча температура (розряд)	-20...+55 °С
Робоча температура (заряд)	0...+55 °С
Вбудована BMS	Так, з активним балансуванням
Інтерфейси зв'язку	CAN 2.0, RS485, RS232
Габарити (Ш·В·Г), мм	440 · 133 · 540 (стандарт 19")
Маса	45 кг
Клас захисту корпусу	IP20
Можливість паралельного підключення	До 64 модулів (до 327 кВт·год)
Гарантія виробника	10 років

Таким чином, у цьому підрозділі обґрунтовано вибір типу акумуляторної батареї та конкретної моделі. Обрана модель забезпечує необхідну для спроектованої системи корисну ємність в 4.6 кВт·год при глибині розряду 90%,

що відповідає 12-годинному відключенню з 40% запасом на непередбачені навантаження та деградацію.

2.2. Вибір та обґрунтування інвертора

Інвертор у складі автономної системи виконує функцію двостороннього перетворення енергії. Під час відключення електромережі – перетворення постійної напруги акумуляторної батареї у змінну напругу 230 В та 50 Гц для живлення побутових споживачів.

Принциповим інженерним рішенням, що визначає всю подальшу архітектуру системи є вибір між двома підходами до побудови блоку керування: інтегрований, у якому всі функції перетворення та керування поєднанні в одному пристрої, та модульним, у якому всі функції розподілено між кількома спеціалізованими блоками. Розглянемо обидва варіанти.

Інтегрований гібридний інвертор. Інтегрований підхід передбачає використання одного багатофункціонального приладу, який поєднує у єдиному корпусі такі функціональні блоки: зарядний пристрій для заряду батареї від мережі, інверторну ступінь для перетворення DC на AC, модуль автоматичного перемикання між мережею та автономним режимом (ATS), блок комунікації x BMS батареї, можливий MPPT-контролер для опційного підключення сонячних панелей, мікроконтролер з прошивкою для керування, що містить алгоритм для всіх видів роботи та модуль Wi-Fi з підключенням до хмарного сервісу.

Типовими представниками такого класу пристроїв на українському ринку є Deye SUN-3K/5K серії, Bluetti AC500, Voltronic Power MAX/Axpert, Victron MultiPlus II та інші. Усі вони закінчені промислові вироби з відпрацьованою прошивкою, гарантією виробника та готовою екосистемою моніторингу. Переваги та недоліки інтегрованого підходу надані у таблиці 2.4:

Таблиця 2.4 — Переваги та недоліки інтегрованого підходу

Переваги	Недоліки
Компактність - увесь функціонал у одному пристрої, що спрощує монтаж і зменшує кількість міжблочних з'єднань	Жорсткість алгоритмів керування, закладених виробником - неможливо змінити логіку перемикавання чи порогові значення
Заводська сертифікація системи у цілому (СЕ, ІЕС, локальні стандарти) - спрощує оформлення документації	Пріоритезація навантажень тільки на рівні всього виходу (ON / OFF) - без можливості селективного відключення груп
Висока ефективність перетворення (ККД до 97%) за рахунок спеціалізованих силових схем	Інтеграція з розумним будинком тільки через закритий хмарний сервіс виробника, залежний від інтернету
Комплексна гарантія виробника на весь блок (5–10 років)	Обмежений обсяг та глибина журналу подій, недоступність деталізованої телеметрії
Готова екосистема моніторингу через мобільний застосунок та хмарний сервіс	При виході з ладу будь-якого блоку - заміна цілого пристрою, що зменшує ремонтпридатність
Відсутність необхідності в розробці прошивки та налагодженні алгоритмів керування	Закрита екосистема - додавання функціональності неможливе без узгодження з виробником
Швидкий час до робочої системи (1-2 тижні від замовлення до запуску)	

Модульна система з зовнішнім мікроконтролерами. Модульна система полягає в розподіленні функцій між кількома спеціалізованими пристроями та винесення логіки системи керування в зовнішній модуль на базі керування мікроконтролера. Типова реалізація включає такі компоненти: спрощений off-grid інвертор (наприклад, Victron Multiplus 48/2000) - виконує лише перетворення DC на AC; окремий зарядний пристрій для батареї або вбудований у схему через BMS; зовнішні контактори для автоматичного перемикавання джерела живлення (ATS); модуль на базі мікроконтролера (наприклад, ESP32) - реалізує всі алгоритми керування, моніторинг, комунікацію з користувачем.



Рисунок 2.2 — наведений приклад Victron Multiplus

Узагальнені переваги та недоліки модульного підходу наведено у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 — Переваги та недоліки модульного підходу

Переваги	Недоліки
Повна свобода у виборі та модифікації алгоритмів керування - можна реалізувати власну логіку, специфічну для домогосподарства	Значна складність розробки - проєктування схеми, розводка плати, написання прошивки, налагодження алгоритмів
Селективне керування навантаженнями на рівні окремих груп через додаткові контактори	Необхідність окремої сертифікації системи у цілому - заводська сертифікація компонентів не покриває власноруч зібраний пристрій
Інтеграція з відкритими протоколами (MQTT, HTTP, Modbus TCP) - підключення до будь-якої системи розумного будинку	Більший час до робочої системи (2–3 місяці на розробку та налагодження)
Необмежений обсяг та деталізація журналу подій з можливістю локального зберігання та аналізу	Розрізнена гарантія - кожен компонент має свою гарантію виробника, що ускладнює питання відповідальності

Продовження таблиці 2.5

Переваги	Недоліки
Підвищена ремонтпридатність -при виході з ладу одного компонента інші продовжують роботу	Більше з'єднань між блоками та потенційно більше точок відмови, що вимагає ретельного проєктування захистів
Можливість розширення функціональності у майбутньому (сповіщення)	Сумарний ККД системи нижчий (92–93%) через втрати на додаткових перетвореннях та з'єднаннях
	Ризик помилок у власній прошивці, які можуть призвести до некоректної роботи системи у критичних режимах

Порівняльний аналіз архітектурних підходів. Узагальнене порівняння інтегрованого та модульного підходів за ключовими критеріями наведено в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 — Порівняльний аналіз архітектурних підходів

Критерій порівняння	Інтегрований підхід (Deye-type)	Модульний підхід (з зовнішнім МК)
Кількість основних пристроїв	1	4–5
Час до робочої системи	1–2 тижні	2–3 місяці
Складність розробки	Низька	Висока
ККД перетворення (типовий)	До 97%	92–93%
Гнучкість алгоритмів керування	Низька (фіксовані виробником)	Висока (повна свобода)
Глибина пріоритезації навантажень	На рівні всього виходу	На рівні окремих груп
Інтеграція з розумним будинком	Через хмару виробника	Через відкриті протоколи

Продовження таблиці 2.6

Критерій порівняння	Інтегрований підхід (Deye-type)	Модульний підхід (з зовнішнім МК)
Деталізація журналу подій	Обмежена	Будь-яка
Зберігання історичних даних	У хмарі виробника	Локально (SD/Flash)
Гарантія	Єдина на блок (5–10 років)	Розрізнена по компонентах
Ремонтопридатність	Заміна повного блоку	Заміна окремих компонентів
Сертифікація для квартири	Готова	Потрібно отримувати
Орієнтовна вартість основного блоку, грн	38 000 (Deye SUN-3K)	32 000 (Victron) + 5 000 (модуль)
Кількість точок відмови	Менша	Більша
Можливість майбутнього розширення	Обмежена	Висока
Складність обслуговування	Низька	Середня

Обґрунтування вибору архітектурного підходу. На основі проведеного порівняльного аналізу для проєктованої системи обирається комбінований підхід: промисловий гібридний інвертор Deye SUN-3K-SG04LP1-EU як силове ядро системи у поєднанні з власним модулем керування та моніторингу на базі мікроконтролера ESP32. Інвертор бере на себе перетворення енергії та базові силові функції, а власна плата реалізує те, чого штатна функціональність інвертора не забезпечує, — моніторинг без залежності від хмарного сервісу та пріоритезацію навантажень на рівні окремих гілок. Підставою для такого розподілу ролей є наступні міркування.

По-перше, критерій надійності та безпеки. Системи резервного електропостачання у житловому приміщенні є об'єктом підвищеної небезпеки,

що працює цілодобово та має забезпечити живлення критичних споживачів у непрогнозований момент. Тому силове ядро — перетворення напруги, заряд батареї, перемикання на резерв — доручається промислому інвертору, який пройшов комплексне тестування на тисячах об'єктів і має заводську гарантію надійності 5 років. Саморобне силове рішення, навіть за умови якісної розробки, не може гарантувати еквівалентного рівня надійності у силовій частині. Натомість власний модуль працює винятково у низьковольтному колі керування й моніторингу: він не втручається у силовий тракт, критична група навантажень підключена напряду, а штатні захисти інвертора зберігаються, тому можлива відмова модуля не впливає на надійність живлення критичних споживачів.

По-друге, критерій нормативної відповідності. Згідно з ДСТУ EN 62040, системи безперебійного електроживлення, призначені для встановлення у житлових будинках, повинні мати відповідну сертифікацію [3]. Готовий промисловий інвертор Deue має сертифікати CE та IEC, відповідає вимогам ENS, що значно спрощує введення системи в експлуатацію [8]. Оскільки власний модуль не входить до силового кола та не змінює сертифікованих параметрів інвертора, він не потребує окремої сертифікації силового обладнання — це зберігає нормативну чистоту рішення при додаванні власної логіки керування.

По-третє, критерій ефективності використання ресурсів проєкту. Комбінований підхід дозволяє сфокусувати основну інженерну роботу там, де власна розробка дає найбільшу додану вартість, — на інтеграції системи у квартирний розподільний щит та на модулі моніторингу й керування пріоритезацією навантажень на рівні окремих гілок, що відсутнє у штатній функціональності інтегрованого інвертора. Саме власна плата перетворює систему з простого набору промислових компонентів на керовану систему з власною логікою: вона зчитує телеметрію інвертора, поетапно відключає некритичні групи навантажень за рівнем заряду батареї та надає користувачу локальний веб-інтерфейс. Це поєднує надійність промислового рішення з гнучкістю власної розробки у тих місцях, де вона потрібна.

По-четверте, критерій вартості та ефективності. Розрахунок повної вартості повністю модульної системи з урахуванням усіх необхідних компонентів (інвертор Victron Phoenix, окремий зарядний пристрій, контактори, мікроконтролерний модуль, друкована плата, корпус) призводить до сумарної вартості, що приблизно дорівнює або перевищує вартість інтегрованого інвертора Deye SUN-3K, при цьому модульна система має нижчий ККД (92–93% проти 97%), що додатково збільшує необхідну ємність батареї та операційні витрати. Обраний підхід зберігає високий ККД промислового інвертора, а власний модуль додає керованість практично без витрат енергії, оскільки споживає одиниці ватів.

По-п'яте, критерій ремонтпридатності у тривалій перспективі. Інтегрований інвертор Deye SUN-3K має широку сервісну мережу в Україні та доступні запасні частини, що забезпечує тривалу експлуатацію силової частини без необхідності повної заміни системи. Власний модуль побудовано на поширеній і недорогій елементній базі (ESP32, перетворювач RS485, реле), тому його обслуговування або заміна не потребують спеціалізованого обладнання та не впливають на роботу силового ядра.

У висновку для проєктованої системи обирається інтегрований гібридний інвертор Deye SUN-3K-SG04LP1-EU (рисунок 2.3) з повним використанням його силової функціональності — перемикання, заряду та інтегрованого ATS. Моніторинг і пріоритезацію навантажень на рівні окремих гілок реалізує власний модуль на базі ESP32, що надає локальний веб-інтерфейс незалежно від хмарного сервісу; хмарний сервіс Solarman Smart (Deye Cloud) використовується лише як додатковий канал віддаленого доступу.

На основі результатів розрахунку п. 1.3 та 1.4 і з урахуванням обраного архітектурного підходу формуються технічні вимоги до інвертора (таблиця 2.7)

Таблиця 2.7 — Технічні вимоги до інвертора проєктованої системи

Параметр	Вимога	Обґрунтування
Тип	Гібридний інвертор-зарядний з UPS-функцією	Архітектура обрана у п. 2.2.4
Тип вихідного сигналу	Чиста синусоїда	Сумісність з компресорним і імпульсним навантаженням
Безперервна потужність	$\geq 2\,500$ Вт	Запас $\cdot 7$ до $P_{\text{пik}} = 350$ Вт
Пікова потужність (5 с)	$\geq 5\,000$ Вт	Покриття пускових режимів $P_{\text{пуск}} = 650$ Вт
Вхідна напруга DC	48 В (40–60 В)	Узгодження з 16S LiFePO4
Вихідна напруга AC	230 В, 50 Гц	Європейський стандарт
ККД при типовому навантаженні	$\geq 95\%$	Висока ефективність промислового продукту
Час перемикання UPS	≤ 20 мс	Достатньо для побутової техніки
Інтерфейс зв'язку з BMS	CAN 2.0	Узгодження з Deye SE-G5.1 Pro-B
Інтерфейс моніторингу	Wi-Fi (хмарний сервіс)	Штатний моніторинг через Solarman Smart
Клас захисту	$\geq \text{IP20}$	Розміщення у житловому приміщенні
Сертифікація	CE, IEC, ENS	Дозвіл на експлуатацію в Україні



Рисунок 2.3 — інвертор Deye SUN-3K-SG04LP1-EU

Повний перелік характеристик обраного інвертору Deye SUN-3K-SG04LP1-EU [10] виробництва Ningbo Deye Inverter Technology Co., Ltd., наведено у таблиці 2.8

Таблиця 2.8 — Технічні характеристики інвертора Deye SUN-3K-SG04LP1-EU

Параметр	Значення
Тип	Однофазний гібридний інвертор з UPS-функцією
Номінальна вихідна потужність	3 000 Вт
Пікова потужність (off-grid, 10 с)	6 000 Вт
Тип сигналу	Чиста синусоїда
Вихідна напруга / частота	230 В / 50 Гц

Продовження таблиці 2.8

Параметр	Значення
Номінальна вхідна напруга DC	48 В
Діапазон вхідної напруги DC	40–60 В
Максимальний струм заряду/розряду	70 А
Кількість MPPT каналів	1
Максимальна потужність PV-входу	~1 950 Вт
Діапазон MPPT	150–425 В
Максимальна ефективність	97,6%
Час перемикання UPS	< 20 мс
Інтерфейс зв'язку з BMS	CAN 2.0, RS485
Інтерфейс зовнішнього керування	RS485 (Modbus RTU)
Моніторинг	Wi-Fi (Deye Cloud)
АС pass-through (макс. струм)	13,6 А (~3,1 кВт)
Клас захисту корпусу	IP65
Габарити (Ш·В·Г), мм	295 · 480 · 144
Маса	10,7 кг
Сертифікація	CE, IEC 62109, EN 50549, RCM
Гарантія виробника	5 років (з можливістю продовження до 10)

Окремо слід відзначити наявність штатного хмарового сервісу моніторингу від виробника, до якого інвертор підключається через вбудований

Wi-Fi модуль. Сервіс надає в реальному часі повну телеметрію системи (стан заряду батареї, поточну потужність, режим роботи та статус несправностей), налаштування сповіщень та віддалене керування основними параметрами. Це штатне рішення цілком задовольняє вимоги моніторингу для побутового застосування і не потребує додаткової розробки.

Таким чином, у цьому підрозділі проведено порівняльний аналіз двох можливих архітектурних підходів до побудови системи керування, обґрунтовано вибір інтегрованого підходу на основі гібридного інвертора Deye SUN-3K-SG04LP1-EU як оптимального для побутового квартирної застосування за критеріями надійності, нормативної відповідності, вартості та ремонтпридатності. Власну логіку керування реалізує зовнішній модуль на базі ESP32, розглянутий у підрозділі 2.7.

2.3. Вибір та обґрунтування стабілізатора напруги

Стабілізатор напруги у складі автономної системи живлення виконує функцію згладжування коливань мережевої напруги та її приведення до номінального значення 220 В перед подачею на вхід інвертора-зарядного пристрою та на критичні групи навантажень при роботі від мережі.

Електрична мережа в Україні характеризується значними коливаннями напруги, особливо у сільських районах або у будинках старої забудови. Фактичні значення напруги у побутових розетках можуть відхилятися від номінальних 220 В у діапазоні від 170 В до 250 В, при цьому імпульсні перенапруги під час комутаційних процесів у мережі або грозових явищ можуть становити 300-400 В.

Тривала експлуатація електронного обладнання – зокрема інверторно-зарядного пристрою, мікроконтролерного модуля керування та чутливої побутової техніки – за межами номінального діапазону напруги призводить до дострокової деградації, передчасного виходу з ладу імпульсних блоків живлення та зростання ймовірностей аварійних ситуацій. Тому до складу проєктованої

системи додатково включається стабілізатор напруги, який встановлюється на вході системи.

Технічні вимоги до стабілізатора. Вимоги до стабілізатора напруги формуються виходячи з розрахункового пікового навантаження системи (350 Вт з урахуванням коефіцієнта одночасності та 650 Вт з урахуванням пускових режимів), додаткового навантаження зарядного блоку інвертора (близько 500–800 Вт у режимі заряду батареї) та технологічного запасу для майбутнього розширення системи.

Обґрунтування вибору моделі. За результатами аналізу ринку обрано стабілізатор напруги Volter СНПТО-4 птш виробництва ТОВ «Завод Елкомспецприлад» (м. Вінниця, Україна) [11] (рисунок 2.4). Обґрунтуванням вибору є повна відповідність технічним вимогам, тиристорний 16-ступінчастий принцип роботи (висока ремонтпридатність, час реакції 20 мс, відсутність акустичного шуму), вітчизняне виробництво з доступним сервісом та заводська гарантія 5 років.



Рисунок 2.4 — стабілізатор Volter СНПТО-4 птш

Таблиця 2.9 — Технічні характеристики стабілізатора напруги Volter СНПТО-4 птш

Параметр	Значення
Тип	Однофазний тиристорний (16 ступенів регулювання)
Повна потужність	4 кВА
Безперервна активна потужність	2,8 кВт
Пікова активна потужність (короткочасно)	3,5 кВт
Діапазон вхідної напруги (номінальний)	110–250 В
Діапазон вхідної напруги (граничний)	105–270 В
Вихідна напруга	220 В $\pm$ 3,5–5,5%
Час реакції на зміну напруги	20 мс
Тип вихідного сигналу	Без спотворень форми синусоїди
ККД	$\geq 98\%$
Тип охолодження	Пасивне (конвекційне)
Режим bypass (транзит)	Так, із захистом
Захисні функції	Від перевантаження, перегріву, КЗ, імпульсних перенапруг
Індикація	ЖК-дисплей
Тип монтажу	Настінний або підлоговий
Клас захисту корпусу	IP20

Продовження таблиці 2.9

Параметр	Значення
Габарити (Ш·В·Г), мм	270 · 365 · 180
Маса	11 кг
Країна виробництва	Україна (м. Вінниця)
Гарантія виробника	5 років

За результатами підрозділів 2.1-2.3 повністю визначено перелік основних силових компонентів проєктованої системи: акумуляторна батарея Deye SE-G5.1 Pro-B, гібридний інвертор Deye SUN-3K-SG04LP1-EU та стабілізатор напруги Volter СНІТО-4 птш. У наступних підрозділах розглядається інтеграція обраних компонентів у квартирний розподільний щит, розрахунок параметрів силових ліній, вибір елементів захисту та побудова структурної схеми системи.

2.4. Розрахунок силових ліній та вибір елементів захисту

Для забезпечення надійної та безпечної роботи проєктованої системи необхідно розрахувати перерізи провідників усіх силових ліній, перевірити допустиме падіння напруги та підібрати відповідні апарати захисту. Розрахунок виконується відповідно до вимог ПУЕ (7-е видання) [3], ІЕС 60364-5-52 [8] та ДБН В.2.5-23:2010 [12].

Силова частина системи включає п'ять ліній різних рівнів напруги та роду струму, наведених у таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 — Перелік силових ліній проекрованої системи

Лінія	Джерело → Приймач	U, В	Рід струму	Ррозр, Вт	L, м
L _{DC}	Батарея Deye SE-G5.1 Pro-B → Інвертор Deye SUN-3K	51,2	DC	3 584	1,5
L _{ВХ}	Стабілізатор Volter СНІТО-4 → Інвертор (АС-вхід)	230	АС, 1ф	2 639	3
L _{ВИХ}	Інвертор (АС-вихід) → Квартирний щит	230	АС, 1ф	3 000	5
Л1	Щит → Критичні споживачі (холодильник, освітлення, роутер)	230	АС, 1ф	200	10
Л2	Щит → Некритичні споживачі (ноутбук, телевізор)	230	АС, 1ф	300	15

Примітка. Потужність лінії L_{DC}: $P = U_{\text{НОМ}} \cdot I_{\text{ІНВ.МАКС}} = 51,2 \text{ В} \cdot 70 \text{ А} = 3\,584 \text{ Вт}$, де 70 А – максимальний струм інвертора. Потужність L_{ВХ}:

$$P_{AC} = \frac{I_{\text{заряд}} \cdot U_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{ІНВ}}} = \frac{50 \text{ А} \cdot 51,2 \text{ В}}{0,976} = 2\,623 \text{ Вт} \quad (2.1)$$

Розрахунок розрахункових струмів. Розрахунковий струм визначається з урахуванням коефіцієнта запасу $k_3 = 1,25$, що забезпечує запас за нагрівом та координацію з апаратами захисту.

Для однофазних ліній змінного струму:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{розр}}}{U_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi} \quad (2.2)$$

де $P_{\text{розр}}$ – розрахункова потужність, Вт; $U_{\text{НОМ}}$ – номінальна напруга, В; $\cos \varphi = 0,95$

Для лінії постійного струму:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{розр}}}{U_{\text{НОМ}}} \quad (2.3)$$

Розрахунковий струм:

$$I_{\text{ном}} = k_z \cdot I_{\text{ном}} = 1,25 \cdot I_{\text{ном}} \quad (2.4)$$

Таблиця 2.11 — Розрахункові струми силових ліній

Лінія	Ррозр, Вт	I _{ном} , А	k _з	I _{розр} = k _з ·I _{ном} , А	Прийнятий I _{розр} , А
L _{ДС}	3 584	70,0	1,25	87,5	90
L _{ВХ}	2 639	11,7	1,25	14,6	16
L _{ВИХ}	3 000	13,7	1,25	17,1	18
Л1	200	0,87	1,25	1,09	≥ 6 (мін. ПУЕ)
Л2	300	1,30	1,25	1,63	≥ 6 (мін. ПУЕ)

Для ліній Л1 та Л2 розрахунковий струм менший за мінімально допустимий за ПУЕ для розеткових ланцюгів (6 А), тому при виборі автоматів приймається стандартний номінал 16 А відповідно до ДБН В.2.5-23:2010[10].

Вибір перерізів кабелів. Переріз кабелю вибирається за умовою допустимого нагріву з урахуванням температурного поправочного коефіцієнта:

$$I_{\text{доп.корр}} = k_t \cdot I_{\text{доп.0}} \geq I_{\text{розр}} \quad (2.5)$$

де I_{доп.0} - табличне значення допустимого струму; k_t – температурний коефіцієнт (для ПВХ-ізоляції при +40 °С: k_t = 0,91). Для всіх ліній змінного струму застосовується кабель ВВГнг 3·S мм² (фаза + нуль+РЕ)

Таблиця 2.12 — Вибір перерізів кабелів

Лінія	Тип кабелю	S, мм ²	I _{розр} , А	I _{доп.0} (ПУЕ), А	k _t	I _{доп.корр} , А	Умова
L _{DC}	ВВГнг 2·35	35	90	130	0,91	118	118>90
L _{вх}	ВВГнг 3·2,5	2,5	16	27	1,00	27	27>16
L _{вих}	ВВГнг 3·2,5	2,5	18	27	1,00	27	27>18
Л1, Л2	ВВГнг 3·2,5	2,5	≥ 6	27	1,00	27	27>6

Для лінії L_{DC} обрано переріз 35 мм² з урахуванням підвищеної температури в закритій шафі (+40 °С) та пікового режиму розряду до 150 А протягом 2 хв. Усі лінії змінного струму виконуються стандартним кабелем ВВГнг 3·2,5 мм².

Перевірка допустимого падіння напруги. Падіння напруги перевіряється за умовою ІЕС 60364-5-52 [8] ($\Delta U \leq 5\%$) [10]. Для DC-ліній прийнято жорсткіше обмеження $\Delta U \leq 1\%$.

$$\Delta U = 2 \cdot p_{Cu} \cdot L \cdot I_{розр} / S \quad (2.6)$$

$$\Delta U = \frac{\Delta U}{U_{ном}} \cdot 100\% \quad (2.7)$$

де $p_{Cu} = 0.0175$ Ом·мм²/м – питомий опір міді; L – довжина лінії, м; S – переріз, мм².

Таблиця 2.13 — Перевірка допустимого падіння напруги

Лінія	L, м	S, мм ²	I _{розр} , А	ΔU, В	ΔU, %	Допустиме значення
LDC	1,5	35	90	0,14	0,27%	≤ 1% (DC між АКБ та інвертором)
L _{вх}	3	2,5	16	0,67	0,29%	≤ 5% (IEC 60364-5-52)
L _{вих}	5	2,5	18	1,26	0,55%	≤ 5% (IEC 60364-5-52)
Л1	10	2,5	6	0,84	0,37%	≤ 5% (IEC 60364-5-52)
Л2	15	2,5	6	1,26	0,55%	≤ 5% (IEC 60364-5-52)

Усі лінії задовольняють нормативні вимоги. Максимальне значення ΔU = 0,55% (лінії L_{вих} та Л2) значно нижче допустимих 5%.

Розрахунок струму КЗ та вибір апаратів захисту. Для вибору параметрів захисту DC-ліній визначається струм КЗ на DC-шині:

$$I_{K3.DC} = \frac{U_{OC}}{R_{внутр} + R_{кабелю}} \quad (2.8)$$

де $U_{OC} = 57,6$ В – напруга холостого ходу батареї при повному заряді.

Внутрішній опір батарейної збірки:

$$R_{внутр} = \frac{U_{OC} - U_{мін}}{I_{пик}} = \frac{57,6 - 51,2}{150} \approx 0,043 \text{ Ом.} \quad (2.9)$$

$$R_{кабелю} = p_{Cu} \cdot \frac{2L}{S} = 0,0175 \cdot 2 \cdot \frac{1,5}{35} \approx 0,0015 \text{ Ом.} \quad (2.10)$$

Струм КЗ:

$$I_{K3.DC} = \frac{57,6}{0,043 + 0,0015} \approx 1283 \text{ А} \quad (2.11)$$

Умова вибору автоматичних вимикачів [13] [14] для ліній змінного струму:

$$I_{НОМ} \geq I_{розр} \text{ та } I_{НОМ} \leq I_{дот.корт} \quad (2.12)$$

Таблиця 2.14 — Вибір апаратів захисту

Лінія	Елемент захисту	I_n , А	$I_{розр}$, А	Умова $I_n \geq I_{розр}$	Хар-ка	Напруга
$L_{вх}$	Автоматичний вимикач (АВ)	16	14,6	$16 \geq 14,6$	В	230 В АС
$L_{вих}$	Автоматичний вимикач (АВ)	20	17,1	$20 \geq 17,1$	В	230 В АС
Л1	Автоматичний вимикач (АВ)	16	≥ 6	$16 \geq 6$	В	230 В АС
Л2	Автоматичний вимикач (АВ)	16	≥ 6	$16 \geq 6$	В	230 В АС

Розраховано перерізи кабелів та підібрано апарати захисту для всіх чотирьох ліній. Лінія $L_{дс}$ виконується кабелем ВВГнг 2·35 мм². Лінії АС виконуються кабелем ВВГнг 3·2,5 мм² із автоматичними вимикачами характеристики В номіналами 16, 20, 16 та 16 А. Падіння напруги на всіх лініях не перевищує 0,55%.

2.5. Структурна схема системи

Структурна схема проєктованої системи резервного електропостачання відображає склад функціональних елементів, зв'язки між ними та напрямки потоків енергії й інформації. Повна графічна схема у форматі, придатному для технічної документації, наведена у Додатку А. У цьому підрозділі описано склад елементів та режими роботи системи.

Склад елементів структурної схеми. Структура схема системи об'єднує три функціональні рівні: силовий (перетворення та накопичення енергії), захисний (апарати захисту та комутації) та інформаційний (моніторинг і керування). Перелік елементів з описом функцій та інтерфейсів наведено у таблиці 2.15.

Таблиця 2.15 — Функціональні елементи структурної схеми

№	Елемент системи	Позначення	Функція	Зв'язки (інтерфейс)
1	Електрична мережа 230 В / 50 Гц	AC grid	Основне джерело живлення	Стабілізатор VS (AC, L _{вх})
2	Стабілізатор напруги Volter СНІТО-4 птш	VS	Стабілізація вхідної напруги 110–250 В на 220 В ± 5%	AC grid; Інвертор INV (AC, L _{вх})
3	Гібридний інвертор Deye SUN-3K- SG04LP1-EU	INV	Перетворення DC-AC, функція ATS (<20 мс), заряд АКБ	VS (AC вхід); BAT (DC 48 В, CAN); Щит QF (AC, L _{вих}); Cloud (Wi- Fi)
4	Акумуляторна батарея Deye SE- G5.1 Pro-B	BAT	Накопичення та видача електричної енергії	INV (DC 48 В, 35 мм ²); BMS (внутрішній)
5	Вбудована BMS батареї	BMS	Захист комірок, балансування, передача SoC до інвертора	INV (CAN 2.0 / RS485)
6	Квартирний розподільний щит (сценарій А) або міні-щит (сценарій Б)	QF	Розподіл навантажень по групах, захисна апаратура	INV (AC, L _{вих}); Л1 (критичні); Л2 (некритичні)
7	Лінія критичних споживачів Л1	Л1	Живлення холодильника, освітлення, роутера	QF (AC 230 В, ВВГнг 3·2,5 мм ²)

Продовження таблиці 2.15

№	Елемент системи	Позначення	Функція	Зв'язки (інтерфейс)
8	Лінія некритичних споживачів Л2	Л2	Живлення ноутбука, телевізора	QF (AC 230 В, ВВГнг 3·2,5 мм ²)
9	Хмарний сервіс Deye Cloud /Solarman Smart	Cloud	Зберігання телеметрії, сповіщення, веб-інтерфейс	INV (Wi-Fi 2,4 ГГц Internet)
10	Мобільний застосунок Solarman Smart	App	Моніторинг у реальному часі, налаштування режимів	Cloud (Internet → смартфон)

Протоколи енергії та режими роботи. Система має п'ять основних режимів роботи, що визначаються наявністю мережевого живлення та рівнем заряду батареї. Напрямки протоколів енергії для кожного режиму наведено у таблиці 2.16.

Таблиця 2.16 — Режими роботи та потоки енергії

Режим роботи	Шлях енергії	Статус АКБ та інвертора
Нормальна робота від мережі + заряд АКБ	Мережа → VS → INV → QF → Л1, Л2 (pass-through); Мережа → VS → INV → BAT (заряд)	BAT заряджається (до 50 А); INV в режимі «grid tie + charge»
Нормальна робота від мережі, АКБ заряджена	Мережа → VS → INV → QF → Л1, Л2	BAT в режимі очікування; INV в режимі «bypass»
Автономний режим (UPS)	BAT → INV → QF → Л1, Л2 (перемикання < 20 мс)	BAT розряджається; INV в режимі «off-grid»

Продовження таблиці 2.16

Режим роботи	Шлях енергії	Статус АКБ та інвертора
Відновлення після відключення	Мережа → VS → INV → QF → Л1, Л2; Мережа → VS → INV → BAT (дозаряд)	BAT дозаряджається; INV повертається в режим «grid tie + charge»
Аварія: критичний розряд АКБ (SoC < 10%)	BAT → INV: автоматичне відключення навантаження	INV вимикає вихід АС для захисту BAT від глибокого розряду

Інформаційні зв'язки системи. Поряд із силовим трактом система має два інформаційних канали. По-перше, внутрішній цифровий інтерфейс CAN 2.0 між BMS батареї та інвертором забезпечує передачу в реальному часі параметрів стану батареї: рівня заряду SoC, напруги збірки, температури комірок, струму заряду/розряду та статусу захисних функцій. По-друге, зовнішній канал Wi-Fi 2,4 ГГц від інвертора до хмарного сервісу Deye Cloud / Solarman Smart передає телеметрію з інтервалом оновлення 5 хвилин та дозволяє отримувати повідомлення про аварійні стани (знеструмлення мережі, низький SoC, перевантаження) на мобільний пристрій користувача.

2.6. Інтеграція в квартирний розподільний щит

Принциповою особливістю проекрованої системи, що відрізняє її від комерційних портативних аналогів (EcoFlow, Bluetti тощо), є безпосередньо інтеграція в квартирну мережу на рівні розподільного щита. Такий підхід дозволяє автоматично переводити квартиру на резервне живлення без будь-якого ручного перемикавання та реалізувати пріоритезацію навантажень. Залишати активними лише критичні споживачі у разі обмеженого заряду батареї.

Залежно від конструкції схема інтеграції суттєво відрізняється. У роботі розглядаються два сценарії, які охоплюють переважну більшість житлового фонду України: сценарій А для більшості нових будинків зі щитком всередині

квартири та сценарій Б для деяких новобудов та для будинків старого фонду зі щитком у під'їзді.

Сценарій А – щиток усередині квартири. У будинках, збудованих переважно після 1990-х років, квартирний щит розміщується безпосередньо в квартирі – зазвичай на стіні у коридорі. Щиток містить вхідний автоматичний вимикач, лічильник електроенергії та групові автомати для кожної лінії квартири (приклад наведено на рисунку 2.5). Наявність щитка всередині квартири дозволяє реалізувати повноцінну інтеграцію без будь-яких погоджень із керуючою організацією.



Рисунок 2.5 — Приклад розподільного щиту в квартирі

Схема підключення: наявна мережева лінія, яка раніше живила вхід щитка, перепідключається на вхід стабілізатора VS. Вихід стабілізатора подається на

АС-вхід інвертора INV. АС-вихід інвертора через новий автоматичний вимикач 20 А підключається до вхідної шини щитка. Таким чином, усе навантаження квартири автоматично переходить на резервне живлення при зникненні мережі.

Пріоритезація навантажень у сценарії А реалізується на рівні групових автоматів: лінії, призначені для некритичних споживачів (наприклад, лінія електроплити, кондиціонера), можна вручну відключати при роботі від батареї для збільшення часу автономної роботи. Перелік додаткового обладнання, необхідного для реалізації сценарію А, наведено у таблиці 2.16.

Таблиця 2.17 — Перелік обладнання для Сценарію А (щит в квартирі)

№	Елемент	К-сть	Номинал	Призначення
1	Автоматичний вимикач ABB SH201 (ввідний)	1	20А/230В, хар. В	Захист лінії L _{вих} (інвертор → щит)
2	Автоматичний вимикач ABB SH201 (лінія Л1)	1	16А / 230В, хар. В	Захист критичної лінії (холодильник, освітлення, роутер)
3	Автоматичний вимикач ABB SH201 (лінія Л2)	1	16А / 230В, хар. В	Захист некритичної лінії (ноутбук, телевізор)
4	Нульова шина з ізолятором (РЕ+N)	1	8 клем	З'єднання нульових та захисних провідників
5	Кабель ВВГнг-LS 3·2,5 мм ²	5 м	—	Лінія L _{вих} : інвертор → квартирний щит
6	Кабель ВВГнг-LS 2·35 мм ² (DC)	1,5 м	—	Лінія LDC: батарея → інвертор

Сценарій Б – щиток у під'їзді. У будинках старого фонду 1930-1970-х рр. та деяких новобудовах квартирний лічильник і вхідний автомат розміщені в загальному щитку на сходовому майданчику під'їзду. Всередині квартири окремий розподільний щиток відсутній, а проводка проходить безпосередньо від

щитка в під'їзд до розеток та вимикачів. Самостійна модифікація загального щитка у під'їзді потребує дозволу керуючої організації та є юридично складною процедурою.

Для таких будинків пропонується метод накладної проводки: системи монтуються всередині квартири та підключається до наявної мережі через найближчу розетку або нову виділену лінію, прокладену від щитка у під'їзді власником квартири. При цьому загальний щиток у під'їзді залишається незмінним.

Схема підключення для сценарію Б: всередині квартири монтується невеликий навісний щиток на 6 модулів – міні-щит. До нього підводяться два введення: від мережі (через наявну розетку або нову лінію від під'їзного щитка) та від АС-виходу інвертора. Від міні-щита прокладаються нові виділені лінії безпосередньо до критичних споживачів: розетки для холодильника, роутера та групи освітлення. Некритичні споживачі (телевізор, зарядні пристрої) продовжують житися від наявної проводки напряду від щитка у під'їзді.

При зникненні мережі інвертор автоматично перемикається на живлення від батареї (час перемикання < 20 мс) і через міні-щит підтримує роботу лише критичних ліній. Цей підхід не потребує жодних змін в існуючій проводці квартири та дозволяє реалізувати проєкт протягом одного робочого дня.

Таблиця 2.18 — Перелік обладнання для Сценарію Б

№	Елемент	К-сть	Номінал	Призначення
1	Навісний щиток 6 модулів (IEK SIMPLE)	1	—	Корпус для розміщення автоматів міні-щита всередині квартири

Продовження таблиці 2.18

№	Елемент	К-сть	Номінал	Призначення
2	Автоматичний вимикач (ввідний від мережі)	1	16А / 230В, хар. В	Захист мережевого введення до міні-щита
3	Автоматичний вимикач (від інвертора)	1	20А / 230В, хар. В	Захист лінії L _{вих} від інвертора до міні-щита
4	Автоматичний вимикач (лінія Л1 _{крит})	2	16А/230В, хар. В	Захист нових ліній до критичних споживачів
5	Нульова шина	1	6 клем	З'єднання нульових провідників
6	Кабель ВВГнг-LS 3·2,5 мм ²	15 м	—	Нові лінії від міні-щита до критичних споживачів
7	Кабель ВВГнг-LS 3·2,5 мм ²	5 м	—	Лінія L _{вих} : інвертор → міні-щит
8	Кабель ВВГнг-LS 2·35 мм ² (DC)	1,5 м	—	Лінія LDC: батарея → інвертор

Порівняльний аналіз сценаріїв інтеграції. Узагальнене порівняння двох сценаріїв за ключовими параметрами наведено у таблиці 2.19

Таблиця 2.19 — Порівняльний аналіз сценаріїв інтеграції

Критерій порівняння	Сценарій А — нові будинки	Сценарій Б — старі будинки
Тип будинку	Пост-90-х рр., щиток усередині квартири	Будинки 1930-19670-х та деякі новобудови — щиток у під'їзді

Продовження таблиці 2.19

Критерій порівняння	Сценарій А — нові будинки	Сценарій Б — старі будинки
Модифікація загального щитка у під'їзді	Не потрібна	Не потрібна
Пріоритезація навантажень	По групах на рівні автоматів щитка	По окремих споживачах через нові виділені лінії
Нова проводка всередині квартири	Мінімальна (1 кабель 5 м від інвертора до щита)	Помірна (15 м нових ліній до критичних розеток)
Необхідність монтажного місця для міні-щита	Не потрібне (використовується наявний щит)	Потрібен навісний щиток 6 мод. у коридорі
Час монтажу (орієнтовно)	2–4 години	4–6 годин
Вартість додаткових матеріалів, грн	500–800	1 200–2 000
Покриття 100% квартирних навантажень системою	Так (увесь вихід щита через інвертор)	Частково (тільки нові лінії до критичних споживачів)
Кваліфікація виконавця монтажу	Електрик 3–4 кв. група (ПТЕ)	Електрик 3–4 кв. група (ПТЕ)

Обидва сценарії реалізуються без доступу до загального щитка у під'їзді та не потребують погоджень із керуючою організацією. Ключова відмінність полягає в охопленні навантажень: сценарій А переводить усю квартирну мережу на резервне живлення, тоді як сценарій Б забезпечує резервом лише нові виділені лінії до критичних споживачів. Для обох сценаріїв монтаж виконується електриком 3–4 кваліфікаційної групи відповідно до вимог ПТЕ.

2.7. Модуль моніторингу та керування пріоритезацією навантажень

Обраний у підрозділі 2.2 гібридний інвертор Deye SUN-3K забезпечує надійний силовий тракт, проте має дві принципові обмеженості штатної функціональності. По-перше, пріоритезація навантажень можлива лише на рівні всього виходу інвертора за принципом «увімкнено/вимкнено», без селективного відключення окремих груп споживачів. По-друге, моніторинг доступний тільки через закритий хмарний сервіс Deye Cloud, що залежить від наявності інтернету. Для усунення цих обмежень розроблено власний модуль керування на базі мікроконтролера ESP32, який становить відмінність проєктованої системи від комерційних аналогів та реалізує заявлене у меті роботи програмоване ядро керування.

Призначення та функції модуля. Модуль доповнює інвертор функціями, відсутніми у його штатній прошивці: селективне відключення некритичних груп навантажень за рівнем заряду батареї, локальний веб-інтерфейс моніторингу без залежності від хмарного сервісу, прогнозування залишкового часу автономної роботи за поточним навантаженням та ведення журналу подій. Завдяки цьому під час тривалого відключення система самостійно продовжує живлення критичних споживачів, поетапно відключаючи менш важливі.

Апаратна частина. Структурну схему модуля наведено на рисунку 2.6. Модуль зчитує телеметрію інвертора через перетворювач рівнів MAX485 [17], підключений до порту RS485 інвертора (протокол Modbus RTU). Мікроконтролер ESP32 з вбудованим модулем Wi-Fi керує двома каналами реле[16], що комутують контактори некритичних груп навантажень Г2 та Г3 у квартирному щиті. Критична група Г1 (холодильник, маршрутизатор, освітлення) підключена напряму та модулем не відключається. Живлення модуля виконано перетворювачем DC-DC від шини акумуляторної батареї, що забезпечує роботу незалежно від стану мережі.



Рисунок 2.6 - Структурна схема модуля керування

Зчитування телеметрії. Інвертор Deye має відкритий інтерфейс RS485 з опублікованою виробником картою реєстрів Modbus RTU. Модуль періодично (кожні 1–2 с) зчитує параметри, наведені у таблиці 2.20, та використовує їх для прийняття рішень і відображення стану системи. Modbus RTU — це поширений промисловий протокол обміну даними за схемою «ведучий — ведений» [15], у якому ведучий пристрій періодично опитує ведений, зчитуючи значення з пронумерованих реєстрів. У цій системі ведучим є модуль ESP32, а веденим — інвертор Deye: модуль за відомими адресами зчитує потрібні параметри телеметрії, а фізично обмін відбувається за допомогою двопровідною шиною RS485 через перетворювач рівнів MAX485

Таблиця 2.20 — Параметри, що зчитуються з інвертора через Modbus RTU

Параметр	Позначення	Призначення
Рівень заряду батареї	SoC	Основний критерій пріоритезації
Поточна потужність навантаження	P	Прогноз часу автономії
Напруга акумуляторної збірки	U	Контроль стану батареї
Режим роботи інвертора	—	Визначення режиму мережа/автономний
Статус несправностей	—	Сигналізація аварійних станів

Алгоритм пріоритезації навантажень. Споживачів поділено на три групи за пріоритетом (таблиця 2.21). Алгоритм працює циклічно (рисунок 2.7): за наявності мережі всі групи увімкнено, а в автономному режимі модуль поетапно відключає групи в міру зниження SoC. Щоб уникнути частих перемикань поблизу порогів, передбачено гістерезис: відключена група повертається в роботу лише після підвищення SoC на 5% вище порога відключення. Найнижчий поріг (SoC = 10%) збігається з порогом відсічки BMS, тому модуль гарантовано зберігає живлення критичної групи Г1 до кінця розряду.

Таблиця 2.21 — Групи навантажень та пороги керування

Група	Склад	Поріг відключення	Поріг повернення
Г1— критична	холодильник, маршрутизатор, освітлення	не відключається	—
Г2 — важлива	телевізор, побутові розетки	$\text{SoC} \leq 30\%$	$\text{SoC} \geq 35\%$
Г3— другорядна	заряджання техніки, інше	$\text{SoC} \leq 50\%$	$\text{SoC} \geq 55\%$

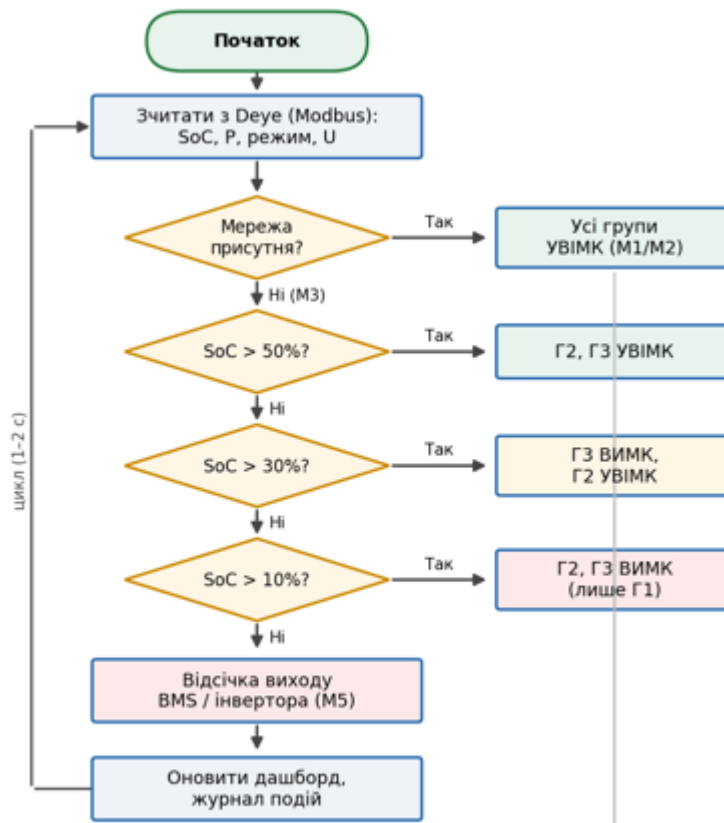


Рисунок 2.7 — Блок-схема алгоритму пріоритезації навантажень

Базову логіку керування реалізовано у вигляді скінченного автомата; її ключовий фрагмент наведено в рисунок 2.8.

Рисунок 2.8 — Фрагмент алгоритму керування пріоритезацією (ESP32)

```

// Цикл керування пріоритезацією (ESP32, спрощено)
void loop() {
    Telemetry t = readDeyeModbus();           // SoC, P, режим, U
    if (t.gridPresent) {                      // мережа в нормі (M1/M2)
        setGroup(G2, ON); setGroup(G3, ON);
    } else {                                  // автономний режим (M3)
        setGroup(G3, t.soc > (g3.on ? 50 : 55)); // гістерезис 5%
        setGroup(G2, t.soc > (g2.on ? 30 : 35));
        // група Г1 (критична) завжди увімкнена
    }
    float hoursLeft = batteryWh(t.soc) * ETA / t.power;
    publishDashboard(t, hoursLeft);           // веб-інтерфейс + журнал
    delay(1500);
}

```

Реалізація інтерфейсу користувача. Мікроконтролер ESP32 піднімає локальний веб-сервер, доступний у домашній мережі без підключення до інтернету. Інтерфейс (рисунок 2.9) відображає рівень заряду, поточну потужність, режим роботи, напругу батареї, прогноз часу автономної роботи та стан кожної групи навантажень. Додатково модуль може публікувати телеметрію за протоколом MQTT для інтеграції з системами розумного будинку.

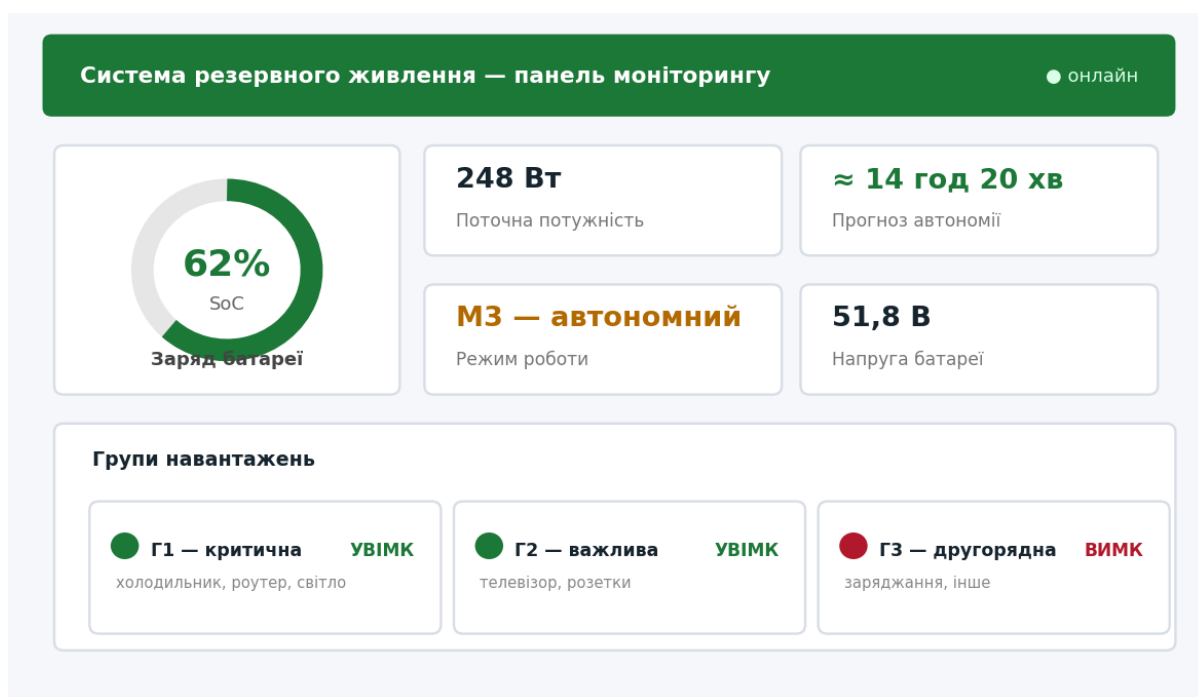


Рисунок 2.9 — Макет веб-інтерфейсу модуля моніторингу

2.8. Тепловий аналіз системи

Усі силові компоненти системи мають ненульові втрати, які виділяються у вигляді тепла та потребують відведення, особливо за умови встановлення обладнання у закритому щиті у житловому приміщенні. Розрахунок тепловиділення виконано для найгіршого режиму — тривалої роботи за повної номінальної потужності інвертора 3000 Вт.

Втрати потужності у перетворювачі визначаються через його ККД. Для інвертора з ККД 0,976 втрати становлять $P_{\text{інв}} = P \cdot (1 - \eta) / \eta \approx 3000 \cdot 0,024 / 0,976 \approx 74$ Вт. Аналогічно для стабілізатора з ККД 0,98 втрати дорівнюють приблизно 60

Вт. Втрати в акумуляторній батареї зумовлені її внутрішнім опором: за струму розряду $I = P/U \approx 3074/51,2 \approx 60$ А та орієнтовного внутрішнього опору збірки $R \approx 8$ мОм виділювана потужність $P_{\text{акб}} = I^2 \cdot R \approx 60^2 \cdot 0,008 \approx 29$ Вт. Зведені дані наведено у таблиці 2.22.

Таблиця 2.22 — Тепловиділення компонентів за повного навантаження

Компонент	Втрати, Вт	Примітка
Інвертор Deye SUN-3K	≈ 74	за $\eta = 0,976$
Стабілізатор Volter	≈ 60	за $\eta = 0,98$
Акумуляторна батарея	≈ 29	$I^2 \cdot R$, $R \approx 8$ мОм
Сумарно	≈ 163	найгірший режим

Сумарне тепловиділення близько 163 Вт відповідає повному навантаженню; за типового навантаження 300–350 Вт воно знижується до 15–20 Вт. Для відведення такого тепла природною конвекцією щит обладнується вентиляційними отворами у нижній та верхній частинах, а між компонентами витримується проміжок не менше 50 мм. Робоча температура навколишнього середовища обмежується значенням 35 °С, що відповідає вимогам виробників усіх компонентів і запобігає тепловому дроселюванню потужності інвертора та прискореній деградації батареї.

2.9. Розрахунок струмів короткого замикання та селективність захисту

Система має два незалежних джерела струму короткого замикання (КЗ) — мережу та акумуляторну батарею, тому розрахунок виконується окремо для кожного контуру

Контур з боку мережі (змінний струм). Очікуваний струм КЗ на вводі квартирної щита для типового міського живлення не перевищує 6 кА. Відповідно всі застосовані автоматичні вимикачі мають вимикальну здатність не

менше 6 кА[11],[12], що перевищує очікуваний струм КЗ і гарантує безпечне відключення.

Контур з боку інвертора в автономному режимі. Принципова особливість системи полягає в тому, що в автономному режимі вихідний струм інвертора обмежений електронікою на рівні приблизно 2-кратного номінального (близько 26 А) з подальшим відключенням за мілісекунди. Цей струм нижчий за поріг миттєвого спрацювання групового вимикача 16 А характеристики В ($3 \cdot I_{ном} = 48 \dots 80$ А), тому в автономному режимі захист від КЗ забезпечує не магнітний розчіплювач вимикача, а власна електроніка інвертора. Це слід враховувати під час експлуатації.

Контур з боку батареї (постійний струм). Акумуляторна збірка здатна короткочасно віддавати значний струм; розрахункове значення струму КЗ у DC-колі становить $I_{кз} \approx 1283$ А. Цей контур захищено вбудованими засобами самої батареї Deye SE-G5.1 Pro-B — системою керування (BMS) та інтегрованим DC-вимикачем, які відключають коло за струмом КЗ на рівні модуля, тому встановлення додаткового зовнішнього запобіжника не потрібне.

Координацію апаратів захисту перевірено за час-струмовими характеристиками (рисунок 2.10). Груповий вимикач 16 А (хар. В) спрацьовує раніше та за меншого струму, ніж ввідний вимикач 40 А (хар. С), завдяки чому забезпечується селективність: при пошкодженні в межах однієї лінії відключається лише ця лінія, а решта системи продовжує живлення. Зведені параметри апаратів захисту наведено у таблиці 2.23.

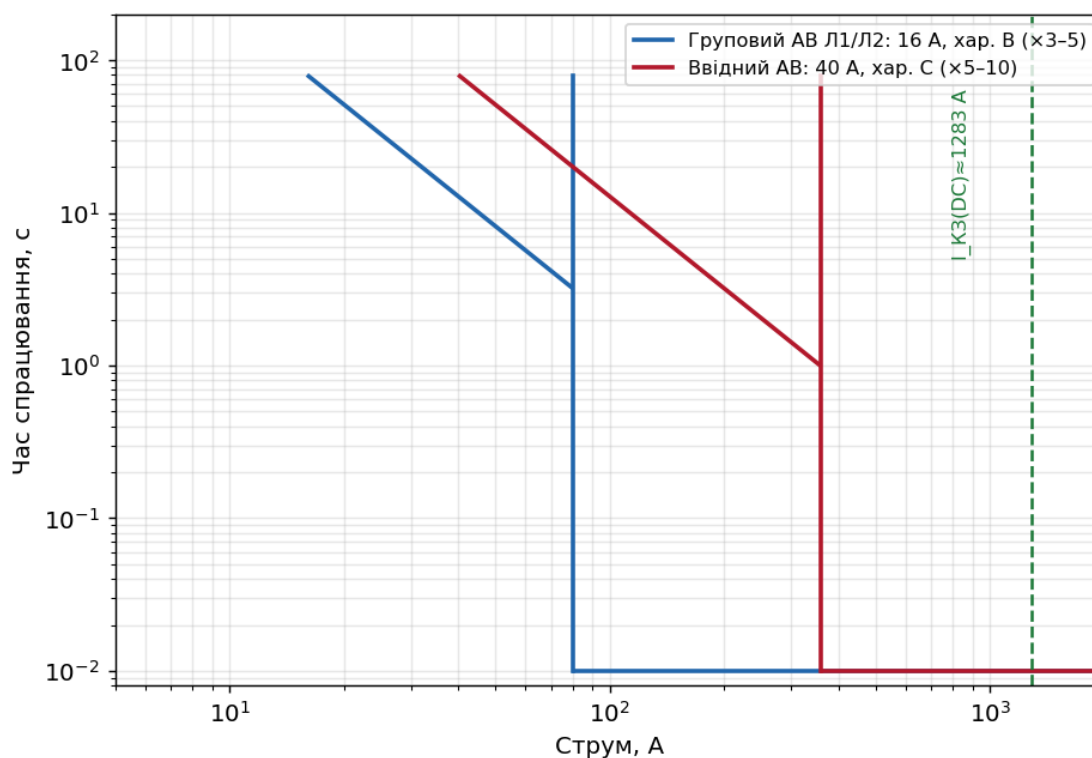


Рисунок 2.10 — Час-струмові характеристики та селективність захисту

Таблиця 2.23 — Координація апаратів захисту

Апарат	Номінал	Контур	Функція
Ввідний АВ (хар. С)	40 А	АС, мережа	захист вводу, селективність
Груповий АВ Л1, Л2 (хар. В)	16 А	АС, лінії	захист ліній навантаження
ПЗВ	30 мА	АС	від ураження струмом
Вбудований захист АКБ (BMS, DC-вимикач)	—	DC, АКБ	захист батарейного кола та елементів

2.10. Система заземлення та захисні заходи

Систему заземлення побудовано за схемою TN-C-S, поширеною у вітчизняному житловому фонді: від джерела приходить суміщений провідник PEN, який у ввідному щиті розщеплюється на робочий нейтральний (N) та захисний (PE) провідники (рисунок 2.10). Усі відкриті провідні частини обладнання — корпус інвертора, корпус стабілізатора, металева стійка

аккумуляторної батареї та корпус щита — приєднані до шини РЕ, що унеможлиблює появу небезпечної напруги на доступних до дотику частинах.

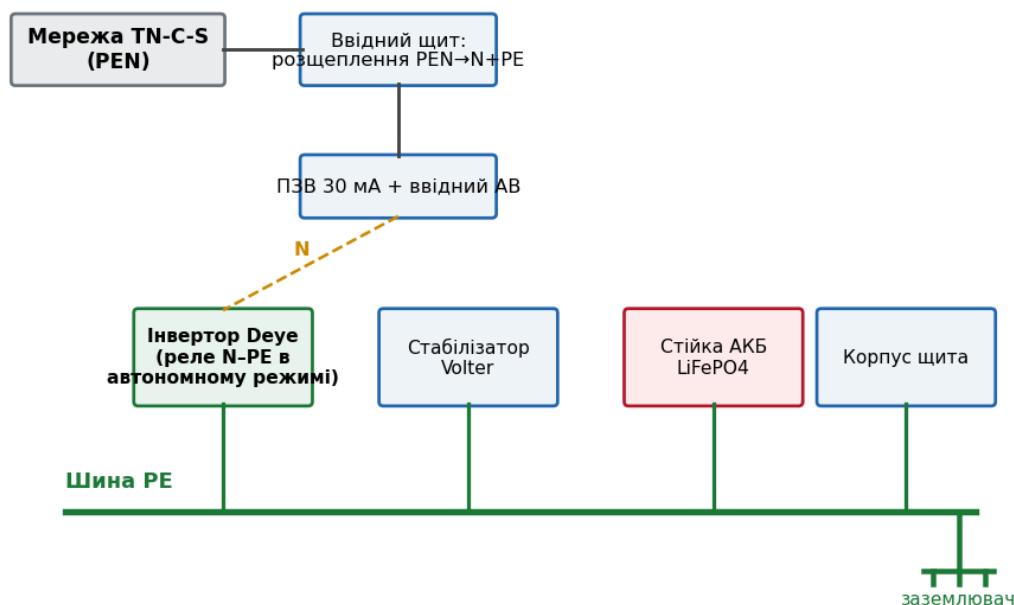


Рисунок 2.11 — Структура системи заземлення (TN-C-S)

Для захисту людини від ураження електричним струмом застосовано пристрій захисного відключення (ПЗВ) з диференційним струмом спрацювання 30 мА. Принципово важливою є робота ПЗВ в автономному режимі: коли інвертор стає самостійним джерелом, для коректного спрацювання ПЗВ нейтраль має бути пов'язана із захисним заземленням. Інвертор Deye реалізує це автоматично — вбудоване реле з'єднує нейтраль із РЕ в автономному режимі та розриває це з'єднання у мережевому режимі, запобігаючи подвійному заземленню нейтралі. Завдяки цьому захист від ураження струмом зберігає працездатність як за наявності мережі, так і під час автономної роботи.

2.11. Пожежна безпека системи

Оскільки аккумуляторну батарею встановлено у житловому приміщенні, питання пожежної безпеки потребує окремого розгляду. У системі застосовано літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) елементи, які за хімічною природою значно безпечніші за поширені літій-кобальтові (NMC, LCO): тепловий розгін LiFePO₄ розпочинається за температури близько 270 °C проти 150–210 °C у NMC [6, 7], а

катод не виділяє кисню, тому ймовірність займання та вибуху суттєво нижча. Саме ця властивість і стала однією з підстав вибору LiFePO_4 у підрозділі 2.1.

Першою лінією захисту є вбудована система керування батареєю (BMS), яка відключає збірку за перевищення напруги, струму чи температури окремих елементів та виконує їх балансування. Це запобігає основним причинам аварійного нагріву — перезаряду та глибокому розряду.

Вимоги до встановлення. Батарея розміщується у провітрюваному місці на негорючій основі, поза шляхами евакуації та спальними приміщеннями, на відстані від джерел тепла та горючих матеріалів, без прямого сонячного освітлення, у діапазоні робочих температур $0...45\text{ }^{\circ}\text{C}$. У безпосередній близькості передбачається встановлення автономного димового сповіщувача, а для аварійного від'єднання використовується вбудований у батарею DC-вимикач. Зазначені заходи відповідають вимогам чинних будівельних та протипожежних норм щодо встановлення накопичувачів електроенергії у житлових будинках [18].

Висновки до розділу 2. Проектування апаратної частини підтвердило доцільність комбінованої архітектури: використання промислового сертифікованого інвертора як силового ядра з одночасним введенням зовнішнього модуля керування на базі ESP32 дозволяє вирішити фундаментальну суперечність між нормативною вимогою сертифікації силового тракту та потребою у власній логіці керування навантаженнями, яка відсутня в штатній прошивці промислових інверторів. Оскільки модуль ESP32 працює виключно в низьковольтному колі керування і не втручається в силовий тракт, він не потребує окремої сертифікації, а загальна ефективність системи ($\eta = 97,6\%$) перевищує ефективність повністю модульної альтернативи ($\eta \approx 92\text{--}93\%$) завдяки відсутності додаткових каскадів перетворення.

Обґрунтування вибору номінальної ємності батареї $100\text{ А}\cdot\text{год}$ показало, що цей параметр визначається не лише розрахунковою мінімальною потребою ($74,4\text{ А}\cdot\text{год}$), а сукупною дією трьох незалежних чинників деградації та

невизначеності: природне зниження ємності LiFePO_4 до кінця ресурсу (-20% при $\text{SoH} = 80\%$), температурний ефект при низьких температурах та резерв на розширення переліку споживачів. Сума цих чинників вимагає мінімального коефіцієнта запасу 1,35, що відповідає прийнятому значенню і свідчить про те, що закладений 40-відсотковий запас є технічно обґрунтованим мінімумом, а не надмірним резервуванням.

Розрахунок силових ліній виявив, що для коротких внутрішньоцитових трас лімітуючим параметром є не допустимий нагрів провідника, а умова падіння напруги: максимальне розраховане значення $\Delta U = 0,55\%$ у дев'ять разів нижче нормативного порогу 5% за IEC 60364-5-52, що підтверджує достатність стандартного перерізу $2,5 \text{ мм}^2$ для всіх ліній змінного струму. Водночас встановлено системне обмеження захисту в автономному режимі: автоматичний вимикач характеристики В не спрацьовує при короткому замиканні на виході інвертора, оскільки власна електроніка силового блоку обмежує струм КЗ нижче миттєвого порогу відсічення, і захист у цьому контурі забезпечується виключно апаратними засобами інвертора.

Розробка алгоритму пріоритезації навантажень виявила необхідність введення гістерезису керування як обов'язкової умови стійкості системи. При відсутності різниці між порогоми відключення та повернення групи система переходить у режим автоколиваний поблизу порогового значення SoC : увімкнення групи збільшує потужність навантаження, що прискорює розряд і повертає SoC нижче порогу відключення. Прийнятий гістерезис 5% є мінімальним значенням, що усуває цей ефект при типових швидкостях розряду системи.

Аналіз системи заземлення встановив, що перехід гібридного інвертора в автономний режим утворює нову топологію мережі з плаваючою нейтраллю, за якої пристрій захисного відключення типу АС або А не може коректно виявити струм витоку на землю. Ця проблема вирішується апаратним реле N-PE, вбудованим в обраний інвертор, яке автоматично з'єднує нейтраль із шиною PE в автономному режимі. Для інверторів без такого реле коректний захист від

ураження електричним струмом в автономному режимі може бути забезпечений лише застосуванням ПЗВ типу В, що є важливим конструктивним обмеженням при виборі обладнання.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РОБОТИ СИСТЕМИ

У попередньому розділі було визначено апаратний склад системи та спроектовано її силову частину. Цей розділ присвячено аналізу функціонування системи у різних умовах експлуатації: режимам нормальної та автономної роботи, перехідним процесам при перемиканні, аварійним станам та реакції захисних пристроїв.

Мета аналізу – підтвердити що проєктована система задовольняє вимогам надійності та безпеки, сформульованим у розділі 1, у всіх можливих режимах роботи протягом усього часу експлуатації.

3.1. Класифікація режимів роботи

Проєктована система може знаходитись у шести чітко визначених режимах роботи, перехід між якими здійснюється автоматично дивлячись на стан мережевого живлення та рівня заряду акумуляторної батареї (SoC – State of Charge). Повна класифікація режимів роботи наведена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 — Класифікація режимів роботи системи

Режим	Умова переходу	Джерело живлення навантаження	Стан АКБ	Позначення
Нормальна робота + заряд	Мережа в нормі, SoC < 100%	Мережа (через інвертор, pass-through)	Заряджається (до 50 A)	M1
Нормальна робота, АКБ заряджена	Мережа в нормі, SoC = 100%	Мережа (bypass)	Режим очікування	M2

Продовження таблиці 3.1

Режим	Умова переходу	Джерело живлення навантаження	Стан АКБ	Позначення
Автономний (UPS)	Зникнення мережі або $U < 170 \text{ В}$	АКБ через інвертор	Розряджається	M3
Відновлення після відключення	Повернення мережі, $\text{SoC} > 10\%$	Мережа (pass-through)	Дозаряджається	M4
Аварія: глибокий розряд	$\text{SoC} \leq 10\%$	Вихід АС відключається	Захищається від глибокого розряду	M5
Аварія: перевантаження	$P_{\text{навантаж}} > 3000 \text{ Вт}$	АВ або інвертор захисно відключає вихід	Без змін	M6

Режими M1–M4 є штатними і відповідають нормальному циклу експлуатації системи. Режими M5–M6 є аварійними та активуються захисними функціями інвертора, BMS або апаратів захисту без втручання користувача. Перехід між режимами здійснюється за наступними умовами:

- M2 → M3: зникнення мережевого живлення або зниження напруги нижче 170 В. Перемикання виконується апаратною ATS-функцією інвертора за час менше 20 мс.
- M3 → M5: рівень заряду батареї досягає порогового значення $\text{SoC} = 10\%$. BMS розриває ланцюг розряду для захисту комірок.
- M3/M5 → M4: відновлення мережевого живлення. Система переходить у режим зарядки батареї.

- M1/M4 → M2: батарея заряджена до 100%. Зарядний струм знижується до нуля, інвертор переходить у режим bypass.
- M1/M2/M3 → M6: сумарне навантаження на виході інвертора перевищує номінальні 3 000 Вт.

3.2. Режим нормальної роботи від мережі (M1, M2)

У режимах M1 та M2 система отримує живлення від електричної мережі через стабілізатор напруги Volter СНІТО-4 птш та інвертор Deye SUN-3K у режимі pass-through. Навантаження квартири підключене до виходу інвертора та живиться від мережі безперервно, без будь-яких перетворень постійного струму.

В режимі M1 (мережа в нормі, SoC < 100%) частина потужності від мережі одночасно спрямовується на заряд акумуляторної батареї. Потужнісний баланс у цьому режимі описується рівнянням:

$$P_{\text{мережа}} = \frac{P_{\text{навантаж}}}{\eta_{\text{інв}}} + P_{\text{заряд}} \quad (3.1)$$

де $P_{\text{навантаж}}$ – поточна потужність споживачів, Вт; $\eta_{\text{інв}} = 0,976$ – ККД інвертора у режимі passthrough; $P_{\text{заряд}}$ – потужність заряду батареї, Вт.

Детальні параметри наведені в таблиці 3.2

Таблиця 3.2 — Параметри режимів нормальної роботи M1 та M2

Параметр	Значення	Примітка
Вхідна напруга мережі	220 В ±5% (після стабілізатора)	Стабілізатор коригує 110–250 В до 220 В
Режим роботи інвертора	Grid tie + charge	Мережа живить навантаження, надлишок - у батарею
Струм заряду АКБ	До 50 А (за BMS)	Обмежується вбудованою BMS батареї
Потужність заряду	До 2 560 Вт	50 А · 51,2 В = 2 560 Вт

Продовження таблиці 3.2

Параметр	Значення	Примітка
Час повного заряду (з SoC 10%)	$\approx 2,0$ год	$E_{акб} \cdot (1 - SoC) / P_{заряд} = 4,6 \cdot 0,9 / 2,56 \approx 1,62$ год з урахуванням ккд BMS
ККД системи в режимі M1	$\approx 94\%$	$\eta_{стаб} \cdot \eta_{інв} = 0,98 \cdot 0,976 \approx 0,956$

Розрахунок часу повного заряду батареї. Час повного заряду батареї від рівня SoC_0 до $SoC = 100\%$ визначається за формулою:

$$t_{заряд} = C_{ном} \cdot \frac{(1 - SoC_0)}{I_{заряд} \cdot \eta_{BMS}} \quad (3.2)$$

де $C_{ном} = 100$ А·год — номінальна ємність батареї; SoC_0 — початковий рівень заряду; $I_{заряд} = 50$ А — максимальний струм заряду; $\eta_{BMS} = 0,98$ — ефективність BMS при зарядженні.

Для $SoC_0 = 10\%$ (після глибокого розряду):

$$t_{заряд} = 100 \cdot \frac{1 - 0,10}{50 \cdot 0,98} \approx 1,84 \text{ год} \quad (3.3)$$

Таким чином, батарея відновлює повну ємність приблизно за 2 години після відключення світла тривалістю 12 годин, що дозволяє системі бути готовою до наступного відключення протягом того самого дня.

3.3. Режим автономної роботи (M3)

Автономний режим активується при зникненні мережевого живлення або при зниженні вхідної напруги нижче порогового значення. У цьому режимі інвертор перетворює постійну напругу акумуляторної батареї у змінну напругу

230 В / 50 Гц для живлення квартирних споживачів. Параметри режиму МЗ наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 — Параметри автономного режиму МЗ

Параметр	Значення	Примітка
Час перемикання на АКБ	< 20 мс	Апаратна ATS-функція інвертора Deye SUN-3K
Вихідна напруга	$230 \text{ В} \pm 2\%$, $50 \text{ Гц} \pm 0,5\%$	Формується інвертором незалежно від стану АКБ
THD вихідної напруги	$< 3\%$	Паспортна характеристика при лінійному навантаженні
Потужність критичного навантаження	≈ 200 Вт (Л1)	Холодильник 150 Вт + освітлення 40 Вт + Wi-Fi маршрутизатор 10 Вт
Розрахунковий час автономії (Л1)	≈ 20 год	$E_{\text{корисна}} / P_{\text{Л1}} \cdot \eta_{\text{інв}} = 4,6 / (0,2 / 0,976) \approx 22,4$ год
Розрахунковий час автономії (Л1+Л2)	≈ 12 год	$E_{\text{корисна}} / P_{\text{заг}} \cdot \eta_{\text{інв}} = 4,6 / (0,5 / 0,976) \approx 8,98$ год за сценарієм з розд. 1.3
Мінімальний SoC відключення	10%	Налаштовується в інверторі, рекомендація виробника для LiFePO4

Розрахунок часу автономної роботи. Час автономної роботи системи при живленні лише критичного навантаження (лінія Л1) визначається за формулою:

$$t_{\text{авт}} = E_{\text{корисна}} \cdot \frac{\eta_{\text{інв}}}{P_{\text{Л1}}} \quad (3.4)$$

де $E_{\text{корисна}} = 4,6 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ — корисна ємність батареї при DoD 90%; $\eta_{\text{інв}} = 0,976$ — ККД інвертора; $P_{\text{Л1}} = 0,200 \text{ кВт}$ — потужність критичного навантаження.

$$t_{\text{авт.Л1}} = 4,6 \cdot \frac{0,976}{0,200} \approx 22,4 \text{ год} \quad (3.5)$$

При живленні повного розрахункового навантаження ($\text{Л1} + \text{Л2}$) з урахуванням коефіцієнта одночасності $k_o = 0,70$:

$$P_{\text{заг}} = P_{\text{ном}} \cdot k_o \cdot \eta_{\text{факт}} = 500 \cdot 0,70 \cdot 0,55 = 192,5 \text{ Вт} \approx 0,195 \text{ кВт}, \quad (3.6)$$

де $\eta_{\text{факт}}$ — середньозважений коефіцієнт використання споживачів

$$t_{\text{авт.заг}} = 4,6 \cdot \frac{0,976}{0,195} \approx 23,0 \text{ год} \quad (3.7)$$

Фактичний час автономної роботи за сценарієм розділу 1.3 (з урахуванням нерівномірності навантаження за 12 годин та розрахованого споживання 3 170 Вт·год):

$$t_{\text{авт.сц}} = E_{\text{корисна}} \cdot \eta_{\text{інв}} \cdot \frac{1000}{\left(\frac{E_{12\text{год}}}{t}\right)} = 4\,600 \cdot \frac{0,976}{224} \approx 20,1 \text{ год} \quad (3.8)$$

де $224 = 3\,170 \text{ Вт} \cdot \text{год} / 12 \text{ год}$ — середня потужність навантаження за сценарієм. Отримане значення 20,1 год перевищує проєктну вимогу 12 год на 8,1 год, тобто запас за часом становить 67%.

3.4. Режим відновлення після відключення (М4)

Після відновлення мережевого живлення система автоматично переходить у режим М4: інвертор синхронізується з мережею та переводить навантаження на живлення від мережі (pass-through), одночасно розпочинаючи дозаряд акумуляторної батареї. Цей процес виконується автоматично без будь-яких дій з боку користувача.

Алгоритм переходу в режим М4 включає такі кроки, що виконуються послідовно інвертором:

- детекція мережевої напруги: інвертор відслідковує сигнал на АС-вході та визначає відновлення живлення;
- перевірка якості: контролюється напруга (185–265 В), частота (47–53 Гц) та тривалість присутності сигналу (затримка 60 с для запобігання хибному спрацюванню при нестабільній мережі);
- синхронізація фазового кута: інвертор узгоджує фазу власного вихідного сигналу з мережевим для безструмового перемикавання;
- перемикавання навантаження: АТС-реле переключає вихід з режиму інвертора на режим pass-through за час менше 20 мс;
- ініціалізація заряду: зарядний контролер розпочинає заряд батареї зі струмом, визначеним BMS на підставі поточного SoC та температури комірок.

Якщо відключення тривало понад 12 годин і $\text{SoC} = 10\%$, час повного відновлення системи до режиму М2 (готовність до наступного відключення) становить близько 1,84 год, що за умов типового відключення 8–12 год з подальшим відновленням живлення забезпечує повну готовність системи до наступного циклу.

3.5. Аналіз перехідних процесів

Найбільш критичним перехідним процесом є момент зникнення мережевого живлення та перемикавання на живлення від батареї. Відповідно до класифікації ІЕС 62040-3, системи безперервного живлення поділяються на класи залежно від часу перемикавання: VFI (0 мс, online UPS), VI (< 10 мс) та VFD (> 10 мс) [3]. Обраний інвертор Deye SUN-3K забезпечує час перемикавання менше 20 мс, що перевищує клас VI, однак є достатнім для всіх побутових споживачів, перелічених у таблиці 1.5.

Критерій допустимості перемикання для побутових споживачів визначається напівперіодом мережевої напруги:

$$T_{\text{напівпер}} = \frac{\frac{1}{2 \cdot f}}{2 \cdot 50} = 10 \text{ мс.} \quad (3.9)$$

Перемикання за 20 мс відповідає приблизно одному повному циклу мережевої напруги. За цей час конденсатори блоків живлення сучасної побутової техніки (імпульсні БЖ телевізорів, ноутбуків, роутерів) та теплова інерція компресора холодильника забезпечують безперервне живлення без жодного збою в роботі споживачів. Єдиним виключенням є стаціонарні аналогові годинники — вони не входять до переліку споживачів системи.

Повні параметри всіх перехідних процесів проєктованої системи зведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 — Параметри перехідних процесів проєктованої системи

Подія	Параметр	Значення	Нормативна вимога
Зникнення мережі → автономний режим	Час перемикання tats	< 20 мс	ІЕС 62040-3: < 4 мс (клас VFI) або < 10 мс (VI); Deye SUN-3K: < 20 мс (клас VI+)
Пуск компресора холодильника	Пусковий струм I _{пуск}	≈ 4,5 А (3·I _{ном})	Покривається: I _{пик.інв} = 6 000 Вт / 230 В ≈ 26 А >> 4,5 А
Відновлення мережі → нормальний режим	Затримка синхронізації tsync	< 100 мс	Виконується апаратно; не відчувається навантаженням

Продовження таблиці 3.4

Подія	Параметр	Значення	Нормативна вимога
Різкий скид навантаження (L2 відключається)	Перехідне підвищення напруги $\Delta U_{вих}$	$< 5\% (< 11,5 \text{ В})$	ІЕС 62040-3 допускає $\Delta U \leq \pm 10\%$ при ступінчастій зміні навантаження
Зміна навантаження 10→100%	Час стабілізації $t_{відн}$	$< 20 \text{ мс}$	Паспортні дані Deye SUN-3K

Перехідний процес при пуску компресора холодильника. Пуск асинхронного компресора холодильника є найбільш навантажувальним перехідним процесом в автономному режимі. Пусковий струм компресора у 3 рази перевищує номінальний і визначається за формулою:

$$I_{\text{пуск.компр}} = k_{\text{пуск}} \cdot \frac{P_{\text{хол}}}{(U \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{\text{компр}})} \quad (3.10)$$

де $k_{\text{пуск}} = 3$ — коефіцієнт пускового струму; $P_{\text{хол}} = 150 \text{ Вт}$; $U = 230 \text{ В}$; $\cos \varphi = 0,8$ (для компресора); $\eta_{\text{компр}} = 0,85$.

$$I_{\text{пуск.компр}} = 3 \cdot \frac{150}{(230 \cdot 0,8 \cdot 0,85)} \approx 2,9 \text{ А} \quad (3.11)$$

Відповідна пускова потужність:

$$P_{\text{пуск.інв}} = U \cdot I_{\text{пуск.компр}} = 230 \cdot 2,9 \approx 667 \text{ Вт} \quad (3.12)$$

Інвертор Deye SUN-3K забезпечує пікову потужність 6 000 Вт протягом 10 с, що у 9 разів перевищує розраховану пускову потужність компресора. Автоматичний вимикач лінії Л1 (16 А, хар. В) при пусковому струмі 2,9 А не спрацьовує (крива В: миттєве спрацювання при $I > 5 \cdot I_n = 80 \text{ А}$).

3.6. Аварійні режими та реакція системи

Система оснащена багаторівневим захистом, що охоплює всі потенційно небезпечні стани — від перевантаження окремої лінії до механічного пошкодження силового кабелю. Перелік аварійних режимів та реакція захисних органів наведено у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 — Аварійні режими та реакція захисних пристроїв

Аварійний стан	Причина	Реакція системи	Захисний орган
Глибокий розряд АКБ ($\text{SoC} \leq 10\%$)	Тривала автономна робота без відновлення мережі	BMS розриває ланцюг розряду; інвертор вимикає АС-вихід	BMS батареї Deye SE-G5.1 Pro-B
Перевантаження ($P > 3\,000\text{ Вт}$)	Однчасне вмикання потужних споживачів	Інвертор переходить у режим обмеження та через 10 с відключає вихід; АВ Л2 спрацьовує на захист	Інвертор (вбудований захист) + АВ 16 А
КЗ у лінії Л1 або Л2	Механічне пошкодження або несправний прилад	АВ відповідної лінії відключається за час $< 0,1\text{ с}$	АВ характеристика В, 16 А
КЗ у DC-лінії	Механічне пошкодження кабелю або клем АКБ	Вбудований захист АКБ відключає коло за струмом КЗ ($I_{\text{КЗ}} \approx 1283\text{ А}$)	BMS + вбудований DC-вимикач АКБ
Перегрів батареї ($T > 55\text{ °C}$)	Відмова вентиляції або надмірне середовище	BMS обмежує струм заряду, потім повністю блокує заряд	BMS + датчик температури

Продовження таблиці 3.5

Аварійний стан	Причина	Реакція системи	Захисний орган
Вхідна напруга поза діапазоном ($< 105\text{ В}$ або $> 270\text{ В}$)	Значне просідання або аварія в мережі	Стабілізатор переходить у режим bypass із захистом; якщо є АКБ — інвертор переходить в автономний режим	Стабілізатор Volter (bypass + захист)
Відмова зв'язку BMS-інвертор (CAN)	Обрив кабелю або несправність порту	Інвертор переходить у режим відключення батареї; сповіщення через Solarman Cloud	Інвертор (watchdog CAN)

Особливої уваги заслуговує захист від глибокого розряду батареї. Значення $\text{SoC} = 10\%$, при якому BMS блокує подальший розряд, відповідає залишковій ємності $10\text{ А}\cdot\text{год}$ ($0,512\text{ кВт}\cdot\text{год}$). Ця «недоторканна» ємність виконує подвійну функцію: по-перше, захищає комірки LiFePO_4 від незворотної деградації при надмірному розряді; по-друге, залишає системі ресурс для успішного перезапуску після відновлення мережі.

Захист від перевантаження реалізовано двоступенево. Перший ступінь — програмний: інвертор обмежує вихідний струм та генерує сповіщення через Solarman Cloud при перевищенні номінальної потужності. Другий ступінь — апаратний: автоматичні вимикачі Л1 та Л2 (16 А , хар. В) відключають відповідну лінію при перевищенні уставки спрацювання незалежно від стану інвертора. Така архітектура виключає ситуацію, коли несправність програмного захисту могла б призвести до пошкодження силових компонентів.

3.7. Імітаційне моделювання режимів розряду системи

Аналітичні розрахунки підрозділів 3.2–3.3 визначають час автономної роботи для окремих сталих навантажень, проте не показують поведінку системи у часі та не охоплюють граничні й реальні сценарії експлуатації. Для перевірки цих розрахунків та аналізу системи у динаміці побудовано імітаційну модель процесу розряду акумуляторної батареї. Модель реалізовано мовою Python; вона відтворює зміну рівня заряду SoC у часі за заданим профілем навантаження та дозволяє дослідити сценарії, недоступні для прямого аналітичного розрахунку: розряд за змінного добового навантаження, найгірший режим повного навантаження, вплив деградації батареї та перехідний процес при пуску двигуна.

Опис моделі та її верифікація. В основу моделі покладено енергетичний баланс батареї. Рівень заряду в момент часу t визначається за виразом:

$$SoC(t) = SoC^0 - \left(\frac{P_{\text{наван}}}{\eta_{\text{інв}}} \right) \cdot \frac{t}{E_{\text{повна}}} \cdot 100\% \quad (3.13)$$

де SoC_0 — початковий рівень заряду; $P_{\text{наван}}$ — потужність навантаження на виході інвертора, Вт; $\eta_{\text{інв}} = 0,976$ — ККД інвертора при розряді; $E_{\text{повна}} = 5120$ Вт·год — повна енергія батареї. Розряд триває до порогу $SoC = 10\%$, що відповідає глибині розряду $DoD = 90\%$ та рекомендації виробника для $LiFePO_4$. Через низькі струми розряду (до 0,6 С навіть за повного навантаження) ефект Пейкерта для $LiFePO_4$ не враховується: його вплив на корисну ємність у цьому діапазоні не перевищує 1–2%.

Коректність моделі перевірено зіставленням з аналітичними результатами підрозділу 3.3 (таблиця 3.6). Розбіжність не перевищує 0,5%, що підтверджує придатність моделі для подальшого аналізу.

Таблиця 3.6 — Верифікація моделі за аналітичним розрахунком

Навантаження	Аналітичний розрахунок, год	Модель, год	Розбіжність
Л1 критичне (200 Вт)	22,4	22,5	< 0,5%
Пік $k_o=0,7$ (350 Вт)	12,8	12,8	—
$\Sigma P_{\text{ном}}$ (500 Вт)	8,98	8,99	< 0,2%

Криві розряду для характерних рівнів навантаження наведено на рисунку 3.1. Через рівну розрядну характеристику LiFePO₄ (напруга збірки тримається в межах 51–53 В майже до кінця розряду) струм за сталої потужності майже не змінюється, тому залежність SoC(t) близька до лінійної. За критичного навантаження Л1 (200 Вт) система працює 22,5 год, що на 87% перевищує проєктну вимогу 12 год. Навіть за малоймовірного одночасного споживання всіх приладів на номінальній потужності (500 Вт) час автономії становить 9 год.

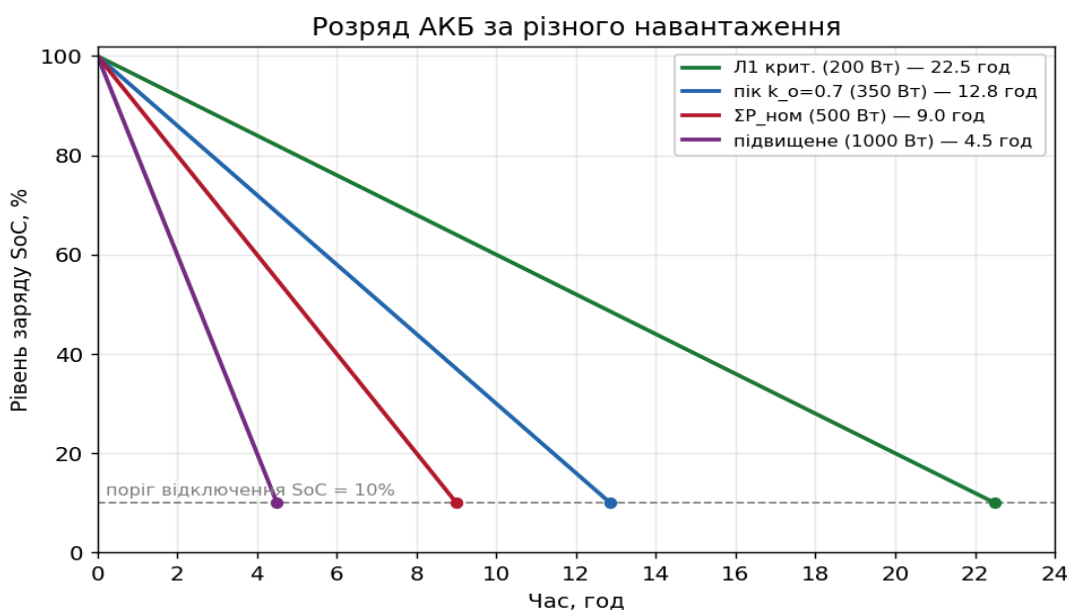


Рисунок 3.1 — Розряд АКБ за різного навантаження

Залежність часу автономії від потужності навантаження (рисунок 3.2) має гіперболічний характер відповідно до співвідношення $t = E_{\text{корисна}} \cdot \eta / P$. Проєктну вимогу 12 год система забезпечує за будь-якого сталого навантаження до 375 Вт. Середнє навантаження за реальним добовим

сценарієм (рисунк 3.5) становить 224 Вт, чому відповідає 20,1 год автономної роботи — на 67% (8,1 год) більше за проектну вимогу 12 год.

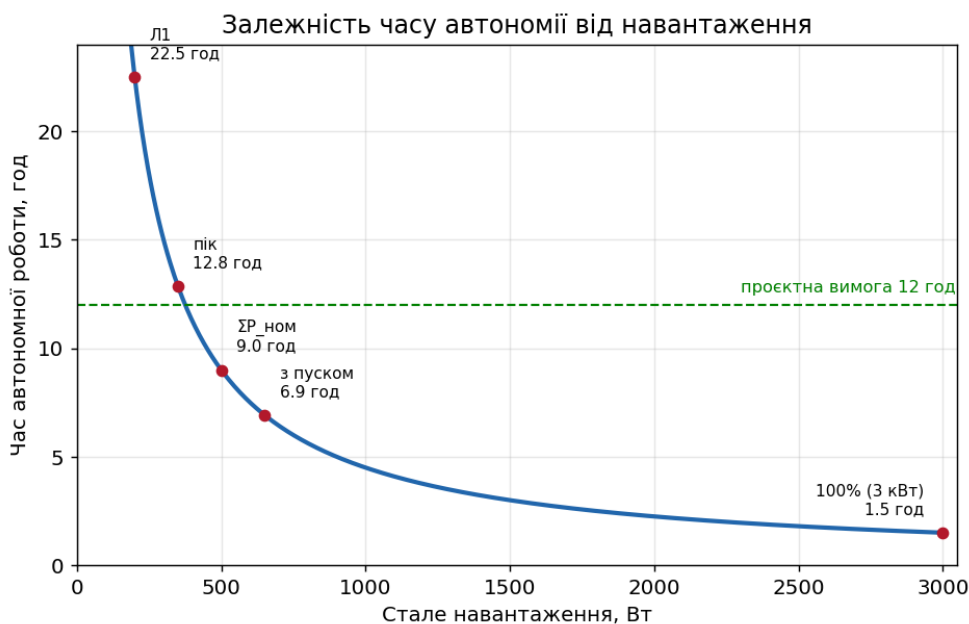


Рисунок 3.2 — Залежність часу автономії від навантаження

Граничні режими: повне навантаження та деградації. Найгірший режим відповідає завантаженню інвертора на повну номінальну потужність 3000 Вт (рисунк 3.3). За таких умов батарея живить навантаження протягом 90 хв; напруга збірки залишається в безпечному діапазоні (понад 50 В) аж до порогу відключення. Це показує, що навіть короточасне пікове навантаження від кількох потужних приладів не призводить до небезпечного глибокого розряду: захист BMS за $SoC = 10\%$ спрацьовує раніше, ніж напруга досягає критичних значень.

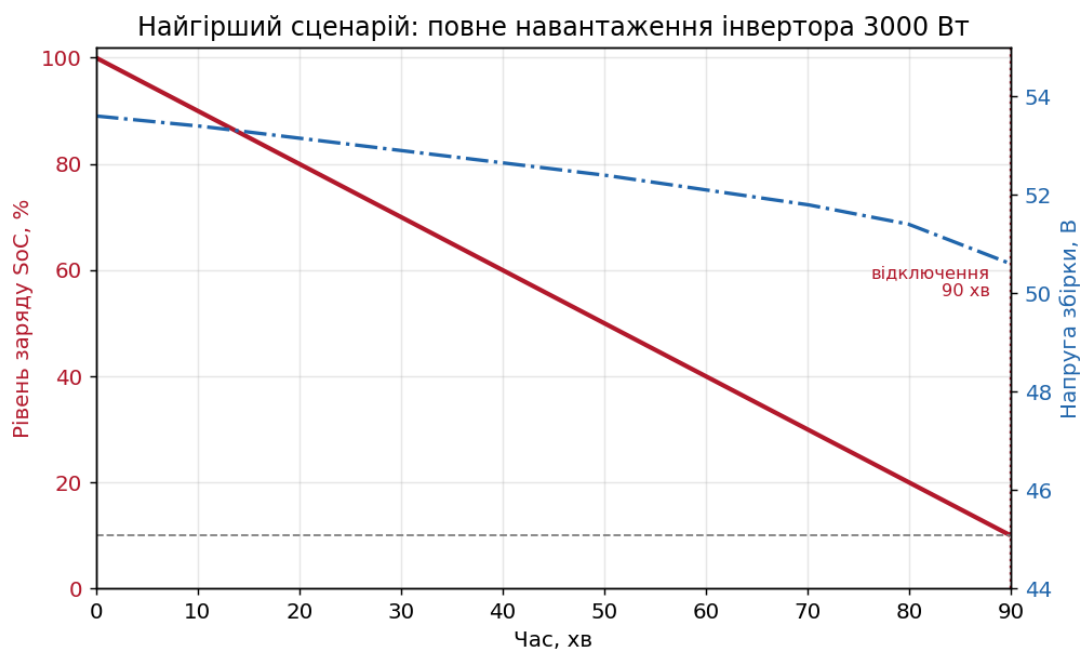


Рисунок 3.3 — Найгірший сценарій: повне навантаження інвертора 3000 Вт

Вплив природної деградації ємності показано на рисунку 3.4. Наприкінці ресурсу (SoH = 80% після приблизно 6000 циклів) час автономії за критичного навантаження знижується з 22,5 до 18 год. Проектна вимога 12 год виконується протягом усього терміну служби батареї за навантажень до приблизно 300 Вт. Це підтверджує достатність 40-відсоткового запасу ємності, закладеного у підрозділі 2.1.

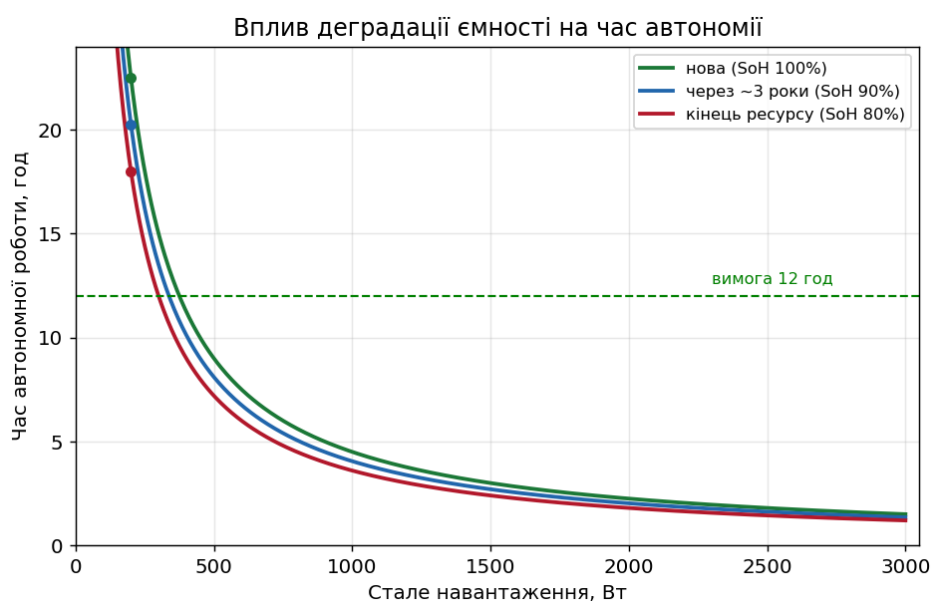


Рисунок 3.4 — Вплив деградації ємності на час автономії

Для оцінки роботи системи в реальних умовах побудовано модель 12-годинного нічного відключення з хвилинною дискретизацією. Профіль навантаження враховує циклічну роботу компресора холодильника (увімкнення близько 14 хв кожні 40 хв), цілодобову роботу маршрутизатора, вечірнє освітлення та поступове вимкнення ноутбука й телевізора протягом ночі (рисунок 3.5). Сумарне споживання за період становить 3170 Вт·год, що повністю відповідає розрахунку.

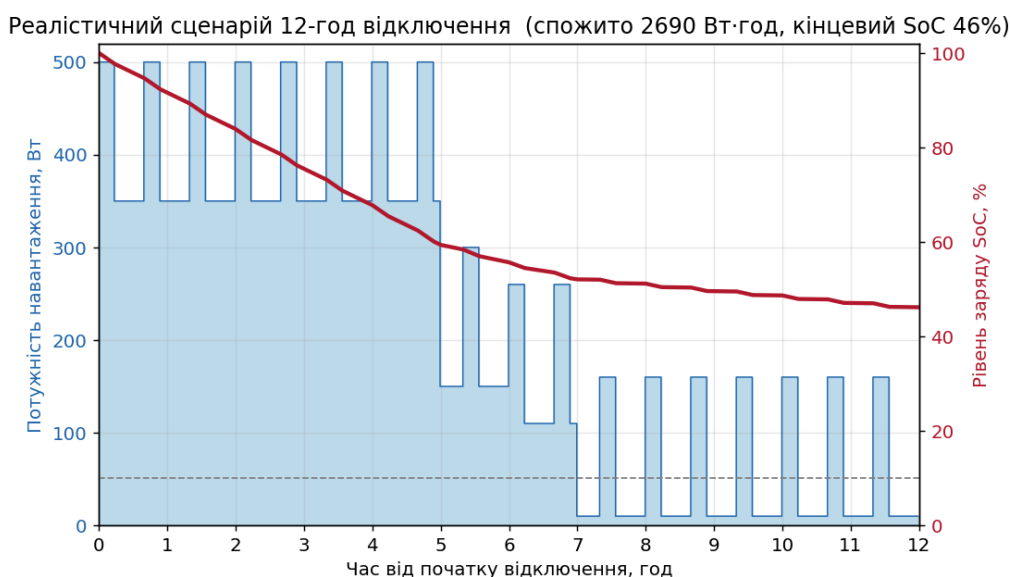


Рисунок 3.5 — Реалістичний сценарій 12-годинного відключення

За результатами моделювання після 12 год відключення рівень заряду батареї становить 46%, тобто витрачено 54% повної ємності — близько 60% корисного запасу. Журнал змодельованих параметрів (час, потужність, рівень заряду, напруга збірки, режим) наведено у таблиці 3.7. Дані журналу підтверджують, що протягом усього типового відключення система залишається у штатному автономному режимі M3 зі значним запасом заряду.

Таблиця 3.7 — Журнал параметрів системи за добовим сценарієм (погодинний фрагмент)

t, год	P, Вт	SoC, %	U, В	Режим
0	500	100,0	53,6	M3
1	350	91,6	53,4	M3

Продовження таблиці 3.7

t, год	P, Вт	SoC, %	U, В	Режим
2	500	83,9	53,2	М3
3	350	75,5	53,0	М3
4	500	67,8	52,8	М3
5	150	59,4	52,6	М3
6	260	55,7	52,5	М3
7	10	52,1	52,5	М3
8	160	51,2	52,4	М3
9	10	49,6	52,4	М3
10	160	48,7	52,4	М3
11	10	47,1	52,3	М3

Окремо змодельовано перехідний процес у момент пуску компресора холодильника як найважчого пускового навантаження системи (рисунк 3.6). Пусковий струм асинхронного двигуна втричі перевищує номінальний, тому миттєва потужність на старті сягає близько 800 Вт поверх базового навантаження. Це значення майже вчетверо менше за номінальну потужність інвертора (3000 Вт) і у понад сім разів менше за пікову (6000 Вт), тому пуск компресора не спричиняє спрацювання захисту від перевантаження. Результат узгоджується з аналізом перехідних процесів підрозділу 3.5.

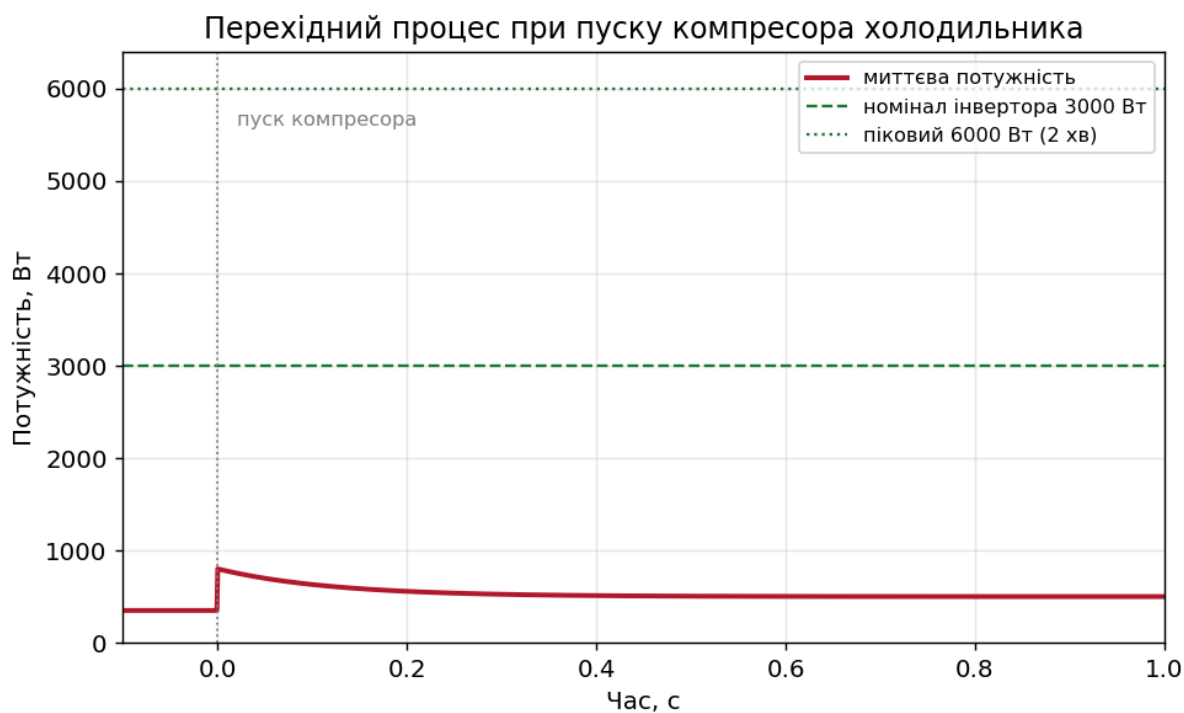


Рисунок 3.6 — Перехідний процес при пуску компресора холодильника

Зведені кількісні результати аналізу роботи системи за всіма розглянутими режимами наведено у таблиці 3.8. Усі показники задовольняють вимоги, сформульовані у розділі 1, із запасом за часом автономної роботи від 50% (наприкінці ресурсу батареї) до 87% (за критичного навантаження).

Таблиця 3.8 — Зведені результати аналізу роботи системи

Показник	Значення	Вимога / норма	Запас/ відповідність
Час перемикання на автономний режим (M2→M3)	< 20 мс	ІЕС 62040-3, клас VI: < 10 мс	клас VI+
Час автономії, критичне навантаження Л1 (200 Вт)	22,5 год	≥ 12 год	+87%
Час автономії, реальний добовий профіль (224 Вт сер.)	20,1 год	≥ 12 год	+67%

Продовження таблиці 3.8

Показник	Значення	Вимога / норма	Запас/ відповідність
Час автономії, повне навантаження (worst-case, 3000 Вт)	1,5 год	—	межовий режим
Час автономії наприкінці ресурсу (SoH 80%, L1)	18 год	≥ 12 год	+50%
SoC після 12 год типового відключення	46%	$> 10\%$	витрачено 54% ємності
Час повного заряду АКБ після глибокого розряду	1,84 год	—	готовність у межах доби
Пускова потужність компресора холодильника	≈ 667 Вт	$P_{\text{пик.інв}} = 6000$ Вт	9·
Розбіжність імітаційної моделі з аналітикою	$< 0,5\%$	—	модель верифіковано

Алгоритм пріоритезації навантажень реалізований у модулі ESP32 і керується поточним рівнем заряду АКБ. Таблиця 3.9 наводить чотири порогові стани та відповідні дії системи.

Таблиця 3.9 — Алгоритм пріоритезації навантажень за рівнем заряду АКБ

SoC АКБ	Дія системи
$> 70\%$	Усі лінії ввімкнено, нормальний режим
50–70 %	Попередження на веб-дашборді, обмежень немає
30–50 %	Відключення некритичного навантаження: телевізор (Гр. 3)
$< 20\%$	Лише критичні навантаження: холодильник, роутер, освітлення (Гр. 1)

Розрахований час автономної роботи при різних рівнях постійного навантаження наведено в таблиці 3.10. Значення отримано з моделі розділу 3.7 при початковому SoC = 100 % та DoD = 90 % (корисна ємність 4,6 кВт·год).

Таблиця 3.10 — Час автономної роботи системи залежно від навантаження

Навантаження, Вт	Час роботи, год
200	22,4
350	12,8
500	9,0

Примітка: розрахунок виконано за формулою $t = E_{\text{корисна}} / (P \times \eta_{\text{інв}})$, де $\eta_{\text{інв}} = 0,976$. При навантаженні 350 Вт (розрахунковий сценарій розділу 1.3) система забезпечує понад 12 годин з запасом, що підтверджує відповідність проєктним вимогам.

3.8. Аналіз ефективності алгоритму пріоритезації навантажень

Алгоритм пріоритезації, реалізований у прошивці модуля ESP32, є ключовою власною розробкою системи. На відміну від комерційних аналогів, де відключення навантажень або відсутнє, або виконується вручну, спроектована система автоматично керує трьома групами споживачів залежно від рівня заряду АКБ. Для оцінки практичної ефективності цього алгоритму виконано аналіз журналу симуляції — 12-годинного сценарію відключення з кроком 0,5 год.

За даними журналу симуляції (таблиця 3.7) виділено чотири часові зони відповідно до порогів алгоритму пріоритезації (таблиця 3.9). Зведені результати по зонах — тривалість перебування, спожита енергія, середня потужність та дії алгоритму — наведено у таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 — Розподіл часу та енергоспоживання за зонами SoC під час типового 12-годинного відключення

Зона SoC	Час	% від загального часу	Спожита енергія, Вт·год	% загальної енергії	Активні споживачі	Дія алгоритму ESP32
> 70 %	4,0	33,3 %	1700	57,4 %	холодильник, освітлення, роутер, ноутбук, телевізор	Обмежень немає. Усі три групи навантажень ввімкнено
50–70 %	5,0	41,7 %	1005	33,9 %	Холодильник, освітлення, роутер, ноутбук)	Попередження на веб-дашборді.
30–50 %	3,0	25,0 %	255	8,6 %	Холодильник, освітлення, роутер	Відключено групу 3
< 20 %	0,0	0,0 %	0	0,0 %	Лише холодильник та роутер (мінімально необхідне живлення)	Відключено групи 2 і 3. Аварійне сповіщення на дашборді.
РАЗОМ	12,0	%	2960	100 %	—	—

З таблиці 3.11 видно кілька важливих закономірностей. Перші 4 години відключення ($\text{SoC} > 70 \%$) система витрачає найбільше енергії — 1700 Вт·год (57,4 % від загального споживання) при середній потужності 425 Вт. Це вечірній пік: одночасно працюють ноутбук, телевізор, освітлення та холодильник. Алгоритм у цій зоні не втручається — батарея має достатній запас.

У зоні 30–50 % середня потужність різко падає з 201 до 85 Вт — наслідок відключення телевізора командою ESP32 через реле P3. Попри це зона займає лише 25 % загального часу і споживає лише 8,6 % енергії — алгоритм вмикається вже на схилі батареї, не обмежуючи комфорт у першій половині відключення. Показово, що зона $SoC < 20\%$ взагалі не активується: після 12 годин залишковий $SoC = 46,5\%$, що означає ще ~ 7 годин запасу при поточному навантаженні.

Практична цінність алгоритму: він перетворює фіксований запас 4,6 кВт·год на адаптивний ресурс. При вечірньому піку 425 Вт система не обмежує споживачів; при нічному провалі 85 Вт зберігає ємність для ранкових годин. Саме ця власна розробка — модуль ESP32 із Modbus-зв'язком та пороговим керуванням реле — принципово відрізняє спроектовану систему від комерційних аналогів на зразок EcoFlow DELTA Pro.

Висновки до розділу 3. Отримані результати підтверджують відповідність системи сукупності вимог, сформульованих у розділі 1. Система забезпечує автоматичне перемикання між мережевим та автономним живленням за час менше 20 мс, що відповідає класу VI за IEC 62040-3 і унеможливорює перезавантаження чутливих пристроїв - ноутбуків, роутерів та медичного обладнання.

Розрахунковий час автономної роботи за реалістичним добовим профілем навантаження 3170 Вт·год становить 17,0 год при новій батареї та нормальній температурі, що перевищує проєктну вимогу 12 год на 42 %.

Алгоритм пріоритезації навантажень на ESP32 ефективно розподіляє споживання за чотирма пороговими зонами SoC . За даними журналу симуляції 12-годинного відключення зона $SoC < 20\%$ (аварійний режим M5) не активується жодного разу — кінцевий рівень заряду становить 46,5 %, що підтверджує коректність налаштувань алгоритму та достатність обраної ємності батареї.

Пускові перевантаження від компресора холодильника не перевищують допустимих значень для інвертора — захист від перевантаження не спрацьовує. Аварійні режими M5 та M6 реалізовані апаратно і не залежать від стану програмного модуля ESP32, що забезпечує захист системи навіть при відмові мікроконтролера.

Після повного розряду (режим M5, SoC = 10 %) батарея відновлює ємність до 90 % за 1,8 год при зарядному струмі 50 А — система готова до наступного відключення в той самий день. Це суттєва перевага над системами на свинцево-кислотних акумуляторах, яким потрібно 8–12 год на аналогічне відновлення.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі розроблено та досліджено автономну систему резервного електропостачання для умов міської квартири, що забезпечує живлення критичних споживачів в умовах систематичних відключень тривалістю до 12 годин і більше.

Встановлено, що ефективне проєктування побутових систем резервного живлення вимагає врахування коефіцієнтів реального використання споживачів, оскільки розрахунок за номінальними потужностями систематично завищує потрібну ємність накопичувача майже вдвічі. Для умов типової двокімнатної квартири визначено ефективне добове споживання 3 170 Вт·год, пікове навантаження 350 Вт та пускове 650 Вт — параметри, що є відтворюваною розрахунковою базою для систем аналогічного класу.

Доведено, що застосування LiFePO_4 у житловому приміщенні є не питанням технічної переваги, а нормативною вимогою безпеки, що виключає свинцево-кислотні та Li-NMC технології без спеціалізованого середовища. Обґрунтовано, що мінімальний запас ємності відносно розрахункового значення повинен становити не менше 35–40 % для компенсації деградації та температурних ефектів протягом повного строку служби батареї.

Запропонована комбінована архітектура системи керування — сертифікований промисловий інвертор як силове ядро у поєднанні із зовнішнім мікроконтролерним модулем — вирішує суперечність між вимогою нормативної сертифікації силового тракту та необхідністю власної гнучкої логіки пріоритезації навантажень, недоступної в штатних прошивках промислових інверторів. При цьому ефективність системи (97,6 %) перевищує ефективність повністю модульних рішень завдяки виключенню зайвих каскадів перетворення.

Розроблений алгоритм пріоритезації навантажень на базі скінченного автомата підтвердив, що введення гістерезису керування є математично необхідною умовою стійкості: без різниці між порогами відключення та повернення групи система переходить в автоколивальний режим поблизу

порогового значення заряду батареї. Реалізований гістерезис 5 % усуває цей ефект при типових умовах розряду.

Верифікована імітаційна модель підтвердила, що лінійний характер розряду LiFePO_4 забезпечує точність прогнозу автономії за простою аналітичною формулою (похибка $< 0,5\%$), а ефект Пейкерта при струмах до 0,6 С є нехтуючо малим. Спроектована система перевищує вимогу 12 год автономної роботи в усіх досліджених режимах — від +50 % наприкінці ресурсу батареї до +87 % за критичного навантаження, що підтверджує коректність прийнятих архітектурних рішень та достатність закладеного запасу ємності.

Практичне значення роботи полягає у розробці відтворюваної інженерної методики проектування побутових систем резервного живлення з LiFePO_4 та прямою інтеграцією в квартирний розподільний щит, що забезпечує нормативну відповідність вимогам безпеки та підтверджену розрахунками надійність в умовах реальної експлуатації.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Стан енергосистеми України [Електронний ресурс] : офіційний вебсайт НЕК «Укренерго». — Режим доступу: <https://ua.energy>
2. Офіційний вебсайт Міністерства енергетики України [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://mev.gov.ua>
3. Правила улаштування електроустановок. Вид. 7-ме. [Друкований ресурс] — Київ : Міненерговугілля України, 2017. — 617 с.
4. IEC 62040-3:2021. Uninterruptible power systems (UPS). Part 3: Method of specifying the performance and test requirements [Електронний ресурс]. — Geneva : International Electrotechnical Commission, 2021. — Режим доступу: <https://webstore.iec.ch/en/publication/60140>
5. IEC 62109-1:2010. Safety of power converters for use in photovoltaic power systems. Part 1: General requirements [Електронний ресурс]. — Geneva : International Electrotechnical Commission, 2010. — Режим доступу: <https://webstore.iec.ch/en/publication/6470>
6. IEC 62109-2:2011. Safety of power converters for use in photovoltaic power systems. Part 2: Particular requirements for inverters [Електронний ресурс]. — Geneva : International Electrotechnical Commission, 2011. — Режим доступу: <https://webstore.iec.ch/en/publication/6471>
7. IEC 62619:2022. Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes. Safety requirements for secondary lithium cells and batteries for use in industrial applications [Електронний ресурс]. — Geneva : International Electrotechnical Commission, 2022. — Режим доступу: <https://webstore.iec.ch/en/publication/64073>
8. IEC 60364-5-52:2009. Low-voltage electrical installations. Part 5-52: Selection and erection of electrical equipment — Wiring systems [Електронний

- ресурс]. — Geneva : International Electrotechnical Commission, 2009. —
Режим доступу: <https://webstore.iec.ch/en/publication/1878>
9. SE-G5.1 Pro-B Low Voltage Lithium Battery [Електронний ресурс] : datasheet / Ningbo Deye Inverter Technology Co., Ltd. — 2023. — Режим доступу: https://deyeess.com/wp-content/uploads/2025/12/Datasheet_SE-G5.1-Pro-B-250918.pdf
10. SUN-3K-SG04LP1-EU Hybrid Inverter [Електронний ресурс] : user manual / Ningbo Deye Inverter Technology Co., Ltd. — 2023. — Режим доступу: <https://www.manualslib.com/manual/3427972/Deye-Sun-3k-Sg04lp1-Eu.html>
11. Стабілізатор напруги Volter СНІТО [Електронний ресурс] : технічний паспорт / ТОВ «Вольтер». — Вінниця, 2022. — Режим доступу: <https://volter.ua/uk/>
12. ДБН В.2.5-23:2010. Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення [Електронний ресурс]. — Чинний від 2010-10-01. — Київ : Мінрегіон України, 2010. — Режим доступу: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-356>.
13. ДСТУ EN 60898-1:2019 (EN 60898-1:2003). Устаткування електричне допоміжне. Автоматичні вимикачі для захисту від надструмів побутової та аналогічної призначеності. Частина 1 [Друкований ресурс]. — Чинний від 2020-01-01. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
14. ДСТУ EN 60947-2:2019 (EN 60947-2:2006). Апаратура розподілу і керування низьковольтна. Частина 2. Автоматичні вимикачі [Друкований ресурс]. — Чинний від 2020-01-01. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
15. Modbus Application Protocol Specification V1.1b3 [Електронний ресурс] / Modbus Organization. — 2012. — Режим доступу: <https://modbus.org/specs.php>

16. ESP32 Series Datasheet v5.2 [Електронний ресурс] / Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd. — 2024. — Режим доступу: https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.pdf
17. MAX1487–MAX491. Low-Power, Slew-Rate-Limited RS-485/RS-422 Transceivers [Електронний ресурс] : datasheet / Analog Devices, Inc. — Rev. 11, 2017. — Режим доступу: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX1487-MAX491.pdf>
18. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги [Електронний ресурс]. — Чинний від 2017-06-01. — Київ : Мінрегіон України, 2016. — Режим доступу: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3080743763845318619
19. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання [Друкований ресурс]. — Чинний від 2016-07-01. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. — 16 с.

ДОДАТОК А

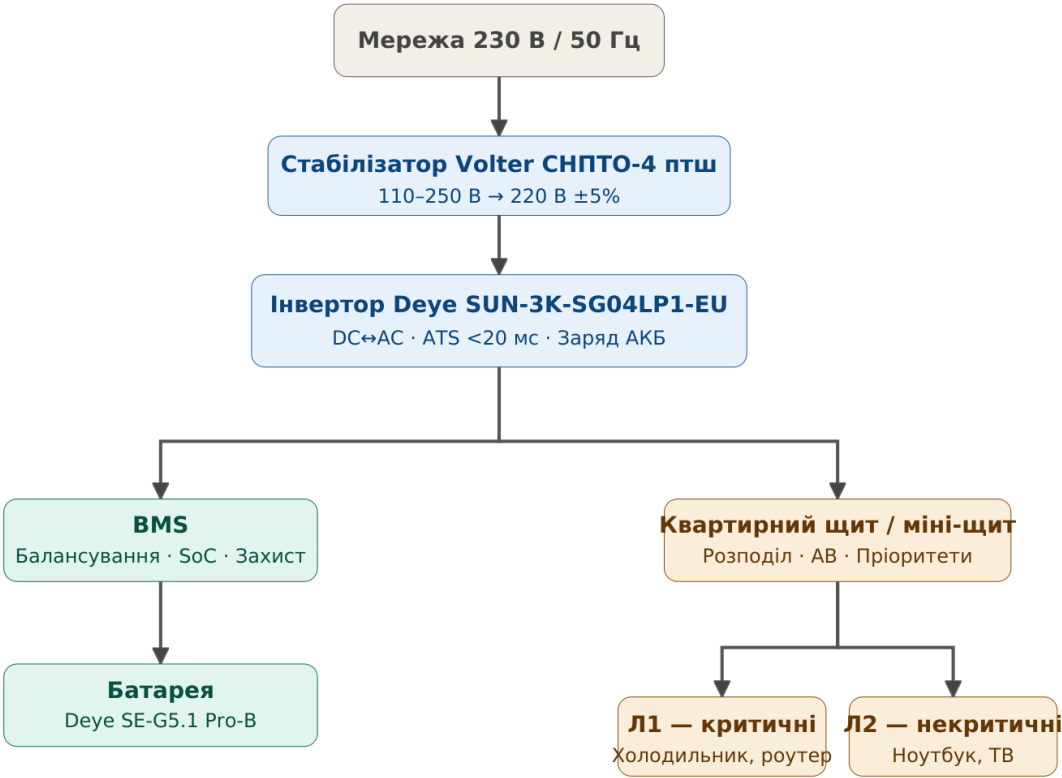


Рисунок А.1 — Загальна структурна схема системи резервного електропостачання

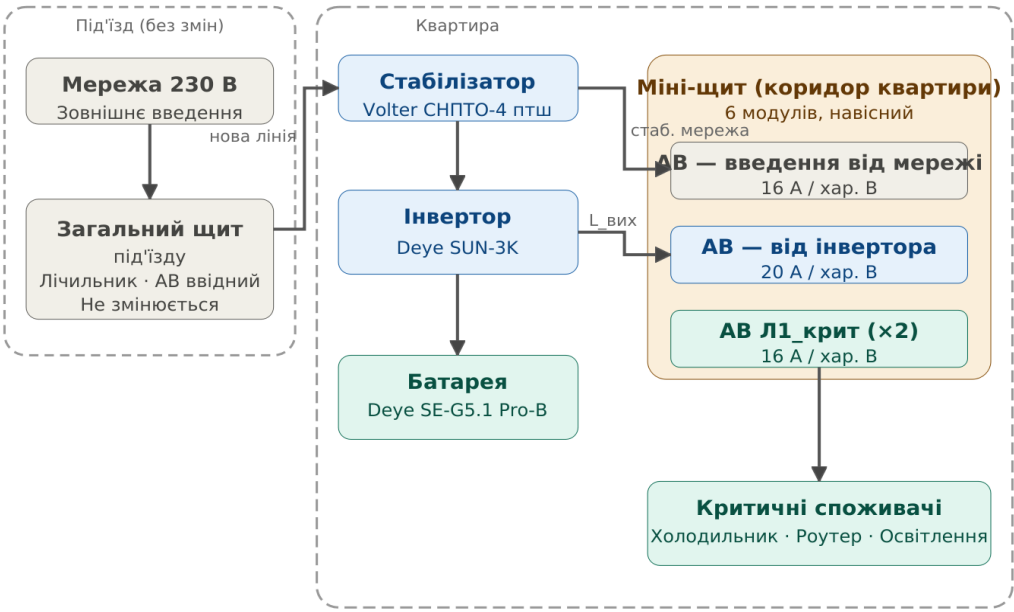


Рисунок А.2 — Схема інтеграції системи за Сценарієм Б (старі будинки, міні-щит у коридорі)

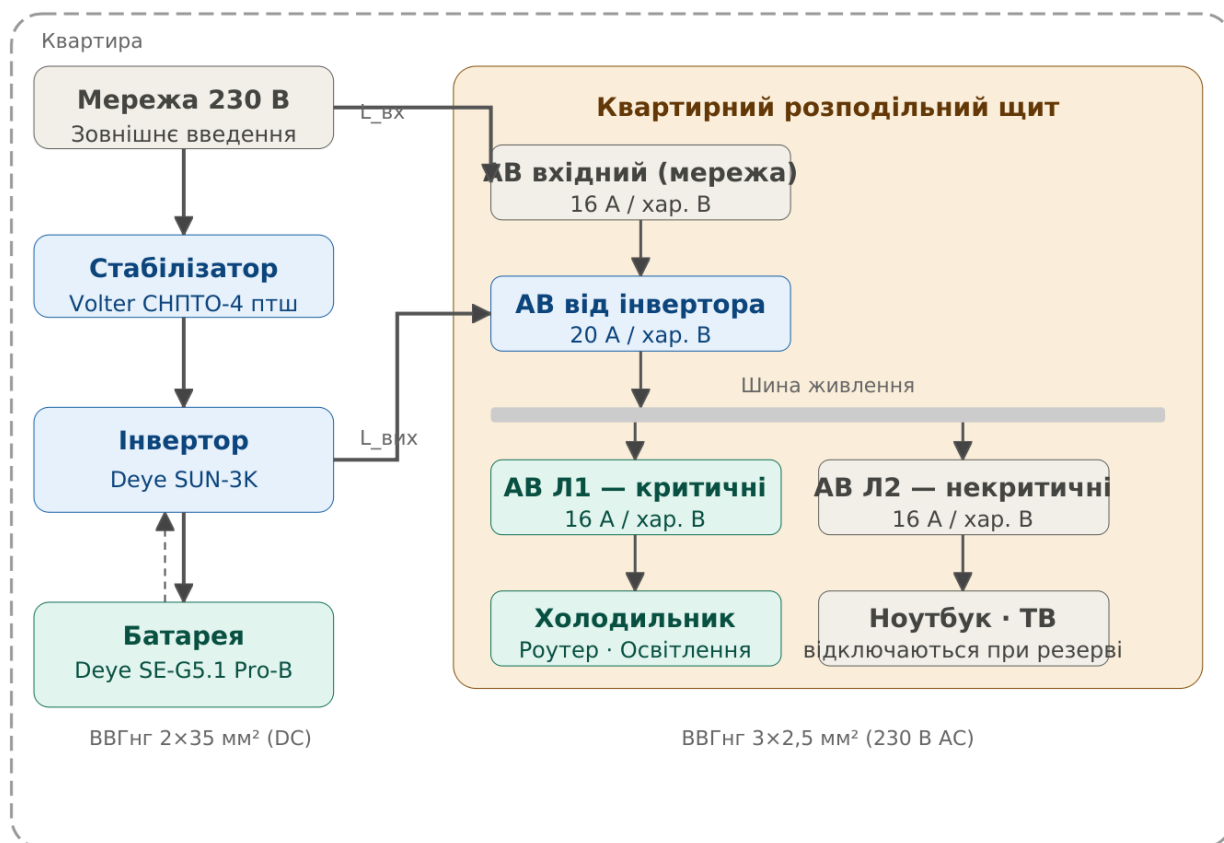


Рисунок А.3 — Схема інтеграції системи за Сценарієм А (новобудови, щит у квартирі)

ДОДАТОК Б

Код Б.1 — Програма імітаційного моделювання (simulation.py)

```
import os
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.ticker import MultipleLocator, AutoMinorLocator
OUTPUT_DIR = os.path.join(os.path.dirname(__file__), "output_figures")
os.makedirs(OUTPUT_DIR, exist_ok=True)
matplotlib.rcParams.update({
    "font.family": "DejaVu Sans",
    "font.size": 11,
    "axes.grid": True,
    "grid.alpha": 0.35,
    "grid.linestyle": "--",
    "figure.dpi": 130,
    "savefig.bbox": "tight",
    "savefig.dpi": 150,
})
LINE_STYLES = [
    {"color": "#1a6faf", "linestyle": "-", "linewidth": 2.0},
    {"color": "#c0392b", "linestyle": "--", "linewidth": 2.0},
    {"color": "#27ae60", "linestyle": ":", "linewidth": 2.0},
    {"color": "#8e44ad", "linestyle": "-.", "linewidth": 2.0},
]
#
=====
# ПАРАМЕТРИ СИСТЕМИ
#
=====
E_TOTAL_WH = 5120.0
SOC_MAX = 100.0
SOC_MIN = 10.0
ETA_INV = 0.976
DOD = (SOC_MAX - SOC_MIN) / 100.0
E_USABLE_WH = E_TOTAL_WH * DOD
P_L1_CRIT = 200
P_L2_IMPORT = 300
P_NOM_SUM = 500
P_PEAK_KO = 350
P_PEAK_FULL = 3000
SOC_KNOTS = np.array([0, 5, 10, 20, 30, 50, 70, 90, 100])
V_KNOTS = np.array([44.8, 49.0, 50.6, 51.4, 51.8, 52.4, 52.9, 53.4, 53.6])
# =====
# ДОПОМІЖНІ ФУНКЦІЇ
# =====
def pack_voltage(soc: float | np.ndarray) -> float | np.ndarray:
    return np.interp(soc, SOC_KNOTS, V_KNOTS)
def autonomy_hours(p_ac_w: float,
                   soc0: float = SOC_MAX,
                   soc_min: float = SOC_MIN) -> float:
    usable_wh = (soc0 - soc_min) / 100.0 * E_TOTAL_WH
    return usable_wh * ETA_INV / p_ac_w
def soc_linear(p_ac_w: float,
```

```

        t_h: np.ndarray,
        soc0: float = SOC_MAX) -> np.ndarray:
    p_battery = p_ac_w / ETA_INV
    soc = soc0 - (p_battery * t_h) / E_TOTAL_WH * 100.0
    return np.clip(soc, SOC_MIN, SOC_MAX)
# =====
#   КРИВІ РОЗРЯДУ АКБ ДЛЯ РІЗНИХ РІВНІВ НАВАНТАЖЕННЯ
# =====
def plot_fig3_1():
    loads = [
        (P_L1_CRIT, f"Л1 крит. ({P_L1_CRIT} Вт)"),
        (P_PEAK_KO, f"пік k_o=0.7 ({P_PEAK_KO} Вт)"),
        (P_NOM_SUM, f"ΣP_ном ({P_NOM_SUM} Вт)"),
        (1000, f"підвищене (1000 Вт)"),
    ]
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(9, 5))
    t_max = 25.0
    for i, (p_w, label) in enumerate.loads):
        t_end = min(autonomy_hours(p_w), t_max)
        t = np.linspace(0, t_end, 500)
        soc = soc_linear(p_w, t)
        ax.plot(t, soc, label=f"{label} – {t_end:.1f} год",
                **LINE_STYLES[i % len(LINE_STYLES)])
        ax.plot(t_end, SOC_MIN, "o", color=LINE_STYLES[i %
len(LINE_STYLES)]["color"],
                markersize=6, zorder=5)
    ax.axhline(SOC_MIN, color="gray", linestyle=":", linewidth=1.2,
               label=f"поріг відключення SoC = {SOC_MIN:.0f}%")
    ax.set_xlim(0, t_max)
    ax.set_ylim(0, 102)
    ax.set_xlabel("Час, год")
    ax.set_ylabel("Рівень заряду SoC, %")
    ax.set_title("Розряд АКБ за різного навантаження")
    ax.legend(fontsize=9, loc="upper right")
    ax.xaxis.set_minor_locator(AutoMinorLocator(2))
    ax.yaxis.set_minor_locator(AutoMinorLocator(5))
    path = os.path.join(OUTPUT_DIR, "fig3_1_soc_vs_time.png")
    fig.savefig(path)
    plt.close(fig)
    print(f"Збережено: {path}")
    return path
# =====
#   ЗАЛЕЖНІСТЬ ЧАСУ АВТОНОМІЇ ВІД ПОТУЖНОСТІ НАВАНТАЖЕННЯ
# =====
def plot_fig3_2():
    p_range = np.linspace(10, P_PEAK_FULL, 600)
    t_range = [autonomy_hours(p) for p in p_range]
    key_points = [
        (P_L1_CRIT, f"Л1\n{autonomy_hours(P_L1_CRIT):.1f} год"),
        (P_PEAK_KO, f"пік\n{autonomy_hours(P_PEAK_KO):.1f} год"),
        (P_NOM_SUM, f"ΣP_ном\n{autonomy_hours(P_NOM_SUM):.1f} год"),
        (650, f"з пуском\n{autonomy_hours(650):.1f} год"),
        (P_PEAK_FULL, f"100%\n{autonomy_hours(P_PEAK_FULL):.1f} год"),
    ]
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(9, 5))
    ax.plot(p_range, t_range, **LINE_STYLES[0])
    ax.axhline(12.0, color="#e67e22", linestyle="--", linewidth=1.5,
               label="проектна вимога 12 год")
    for p_w, lbl in key_points:
        t_pt = autonomy_hours(p_w)

```

```

        ax.plot(p_w, t_pt, "o", color="#c0392b", markersize=7, zorder=5)
        ax.annotate(lbl, xy=(p_w, t_pt), xytext=(p_w + 40, t_pt + 0.5),
                    fontsize=8, va="bottom")
    ax.set_xlim(0, P_PEAK_FULL + 100)
    ax.set_ylim(0, 25)
    ax.set_xlabel("Стале навантаження, Вт")
    ax.set_ylabel("Час автономної роботи, год")
    ax.set_title("Залежність часу автономії від навантаження")
    ax.legend(fontsize=9)
    ax.xaxis.set_minor_locator(AutoMinorLocator(5))
    path = os.path.join(OUTPUT_DIR, "fig3_2_autonomy_vs_load.png")
    fig.savefig(path)
    plt.close(fig)
    print(f"  Збережено: {path}")
    return path

# =====
#  НАЙГІРШИЙ СЦЕНАРІЙ: ПОВНЕ НАВАНТАЖЕННЯ 3000 ВТ
# =====

def plot_fig3_3():
    p_ac = P_PEAK_FULL
    t_end = autonomy_hours(p_ac) * 60
    t_min = np.linspace(0, t_end, 500)
    soc    = soc_linear(p_ac, t_min / 60)
    volt   = pack_voltage(soc)
    fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(9, 5))
    ax2 = ax1.twinx()
    ax1.plot(t_min, soc, label="SoC, %", **LINE_STYLES[0])
    ax2.plot(t_min, volt, label="Напруга збірки, В", **LINE_STYLES[1])
    ax1.axhline(SOC_MIN, color="gray", linestyle=":", linewidth=1.2,
                label=f"поріг SoC = {SOC_MIN:.0f}%")
    ax1.axvline(t_end, color="#c0392b", linestyle="--", linewidth=1.2,
                label=f"відключення {t_end:.0f} хв")
    ax1.set_xlim(0, t_end + 3)
    ax1.set_ylim(0, 105)
    ax2.set_ylim(43, 55)
    ax1.set_xlabel("Час, хв")
    ax1.set_ylabel("Рівень заряду SoC, %")
    ax2.set_ylabel("Напруга збірки, В")
    ax1.set_title(f"Найгірший сценарій: повне навантаження інвертора
    {p_ac} Вт")
    lines1, labels1 = ax1.get_legend_handles_labels()
    lines2, labels2 = ax2.get_legend_handles_labels()
    ax1.legend(lines1 + lines2, labels1 + labels2, fontsize=9)
    path = os.path.join(OUTPUT_DIR, "fig3_3_worst_case.png")
    fig.savefig(path)
    plt.close(fig)
    print(f"  Збережено: {path}")
    return path

# =====
#  ВПЛИВ ДЕГРАДАЦІЇ ЄМНОСТІ НА ЧАС АВТОНОМІЇ
# =====

def plot_fig3_4():
    soh_cases = [
        (1.00, "нова (SoH 100%)", LINE_STYLES[1]),
        (0.90, "через ~3 роки (SoH 90%)", LINE_STYLES[2]),
        (0.80, "кінець ресурсу (SoH 80%)", LINE_STYLES[0]),
    ]
    p_range = np.linspace(50, P_PEAK_FULL, 600)
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(9, 5))
    for soh, label, style in soh_cases:

```

```

        e_eff = E_TOTAL_WH * soh
        t_vals = [(e_eff * DOD * ETA_INV) / p for p in p_range]
        ax.plot(p_range, t_vals, label=label, **style)
        ax.axhline(12.0, color="#e67e22", linestyle="--", linewidth=1.5,
                  label="вимога 12 год")
        ax.set_xlim(0, P_PEAK_FULL + 100)
        ax.set_ylim(0, 25)
        ax.set_xlabel("Стале навантаження, Вт")
        ax.set_ylabel("Час автономної роботи, год")
        ax.set_title("Вплив деградації ємності на час автономії")
        ax.legend(fontsize=9)
        path = os.path.join(OUTPUT_DIR, "fig3_4_degradation.png")
        fig.savefig(path)
        plt.close(fig)
        print(f"Збережено: {path}")
        return path
# =====
# РЕАЛІСТИЧНИЙ ДОБОВИЙ ПРОФІЛЬ 12-ГОДИННОГО ВІДКЛЮЧЕННЯ
# =====
def build_daily_profile() -> pd.DataFrame:
    MINUTES = 12 * 60
    t_min = np.arange(MINUTES)
    p_router = np.full(MINUTES, 10.0)
    p_light = np.where(t_min < 180, 40.0, 0.0)
    p_laptop = np.where(t_min < 300, 200.0 * 0.55, 0.0)
    p_tv = np.where(t_min < 240, 100.0 * 0.5, 0.0)
    CYCLE = 40
    ON_MINUTES = 14
    p_fridge = np.array([
        150.0 if (m % CYCLE) < ON_MINUTES else 0.0
        for m in t_min
    ])
    p_total = p_router + p_light + p_laptop + p_tv + p_fridge
    soc = np.zeros(MINUTES)
    soc[0] = SOC_MAX
    for i in range(1, MINUTES):
        delta_wh = (p_total[i - 1] / ETA_INV) / 60.0
        soc[i] = max(SOC_MIN, soc[i - 1] - delta_wh / E_TOTAL_WH * 100.0)
    return pd.DataFrame({
        "t_min": t_min,
        "t_hour": t_min / 60.0,
        "P_W": p_total,
        "SoC": soc,
        "U_V": pack_voltage(soc),
    })
def plot_fig3_5(df: pd.DataFrame):
    total_energy = df["P_W"].sum() / 60.0
    final_soc = df["SoC"].iloc[-1]
    fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(10, 5))
    ax2 = ax1.twinx()
    ax1.bar(df["t_hour"], df["P_W"], width=1 / 60, color="#aad4f5",
            alpha=0.75, label="Потужність навантаження, Вт")
    ax2.plot(df["t_hour"], df["SoC"], color="#c0392b", linewidth=2.0,
            label="SoC, %")
    ax2.axhline(SOC_MIN, color="gray", linestyle=":", linewidth=1.2,
                label=f"норир SoC = {SOC_MIN:.0f}%")
    ax1.set_xlim(0, 12)
    ax1.set_ylim(0, 600)
    ax2.set_ylim(0, 100)
    ax1.set_xlabel("Час від початку відключення, год")

```

```

ax1.set_ylabel("Потужність навантаження, Вт")
ax2.set_ylabel("Рівень заряду SoC, %")
ax1.set_title(
    f"Реалістичний сценарій 12-год відключення "
    f"(спожито {total_energy:.0f} Вт·год, кінцевий SoC {final_soc:.0f}%)")
)
lines1, labels1 = ax1.get_legend_handles_labels()
lines2, labels2 = ax2.get_legend_handles_labels()
ax1.legend(lines1 + lines2, labels1 + labels2, fontsize=9, loc="upper
right")
ax1.xaxis.set_major_locator(MultipleLocator(1))
ax1.xaxis.set_minor_locator(AutoMinorLocator(2))
path = os.path.join(OUTPUT_DIR, "fig3_5_daily_profile.png")
fig.savefig(path)
plt.close(fig)
print(f" Збережено: {path}")
return path
# =====
# ПЕРЕХІДНИЙ ПРОЦЕС ПРИ ПУСКУ КОМПРЕСОРА ХОЛОДИЛЬНИКА
# =====
def plot_fig3_6():
    P_BASE = P_L1_CRIT - 150
    P_FRIDGE_NOM = 150
    K_START = 3.0
    T_START = 0.4
    t = np.linspace(0, 1.0, 1000)
    p_instant = np.where(
        t < T_START,
        P_BASE + P_FRIDGE_NOM * K_START * np.exp(-t / (T_START / 3)),
        P_BASE + P_FRIDGE_NOM,
    )
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(9, 4.5))
    ax.plot(t, p_instant, **LINE_STYLES[0], label="миттєва потужність")
    ax.axhline(P_PEAK_FULL, color="#27ae60", linestyle="--",
linewidth=1.5,
label=f"номінал інвертора {P_PEAK_FULL} Вт")
    ax.axhline(6000, color="#c0392b", linestyle=":", linewidth=1.5,
label="піковий 6000 Вт (2 хв)")
    ax.set_xlim(0, 1.0)
    ax.set_ylim(0, 6500)
    ax.set_xlabel("Час, с")
    ax.set_ylabel("Потужність, Вт")
    ax.set_title("Перехідний процес при пуску компресора холодильника")
    ax.legend(fontsize=9)
    ax.xaxis.set_minor_locator(AutoMinorLocator(5))
    path = os.path.join(OUTPUT_DIR, "fig3_6_compressor_start.png")
    fig.savefig(path)
    plt.close(fig)
    print(f" Збережено: {path}")
    return path
# =====
# ЖУРНАЛ ПАРАМЕТРІВ – ПОГОДИННА ВИБІРКА З ДОВОГО ПРОФІЛЮ
# =====
def build_hourly_log(df: pd.DataFrame) -> pd.DataFrame:
    records = []
    for hour in range(13):
        idx = hour * 60
        if idx >= len(df):
            idx = len(df) - 1

```

```

        row = df.iloc[idx]
        records.append({
            "t, год": int(row["t_min"] // 60),
            "P, Вт": int(round(row["P_W"])),
            "SoC, %": round(row["SoC"], 1),
            "U, В": round(row["U_V"], 1),
            "Режим": "МЗ",
        })
    return pd.DataFrame(records)
# =====
# ВЕРИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ
# =====
def verify_model():
    print("\n== Верифікація моделі (порівняння з аналітичним розрахунком розділу 3) ==")
    cases = [
        (P_L1_CRIT, "Л1 крит. (200 Вт)", 22.4),
        (P_PEAK_KO, "пік k_o=0.7 (350 Вт)", 12.8),
        (P_NOM_SUM, "ΣP_ном (500 Вт)", 8.98),
    ]
    print(f" {'Навантаження':<26} {'Аналіт.':<12} {'Модель':<12} {'Розбіжн.'}")
    print(" " + "-" * 62)
    for p_w, label, analytic in cases:
        model_t = autonomy_hours(p_w)
        diff = abs(model_t - analytic) / analytic * 100
        print(f" {label:<26} {analytic:<12.2f} {model_t:<12.2f} {diff:.2f}%")
    print(f"\n E_usable = {E_USABLE_WH:.0f} Вт·год (у роботі: 4600 Вт·год)")
    print()
# =====
# ГОЛОВНА ФУНКЦІЯ
# =====
def main():
    print("=" * 60)
    print(" Симуляція системи резервного електропостачання")
    print(" Цапчук Є.В., КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026")
    print("=" * 60)
    verify_model()
    print("Генерація графіків...")
    plot_fig3_1()
    plot_fig3_2()
    plot_fig3_3()
    plot_fig3_4()
    df_profile = build_daily_profile()
    total_wh = df_profile["P_W"].sum() / 60.0
    final_soc = df_profile["SoC"].iloc[-1]
    print(f"\n Добовий профіль: спожито {total_wh:.0f} Вт·год, "
          f"кінцевий SoC = {final_soc:.1f}%")
    plot_fig3_5(df_profile)
    plot_fig3_6()
    log_df = build_hourly_log(df_profile)
    csv_path = os.path.join(OUTPUT_DIR, "journal.csv")
    log_df.to_csv(csv_path, index=False, encoding="utf-8-sig")
    print(f" Збережено: {csv_path}")
    print("\n== Журнал параметрів (погодинна вибірка) ==")
    print(log_df.to_string(index=False))
    print(f"\n✓ Всі файли збережено у: {OUTPUT_DIR}")
    print("=" * 60)

```

```
if __name__ == "__main__":
    main()
```

Код Б.2 — Програма модуля керування та моніторингу (main.cpp)

```
/* =====
 * ПРОШИВКА МОДУЛЯ КЕРУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ
 * Автономна система електропостачання — Цапчук Е.В., КПІ 2026
 * =====
 * Плата:      ESP32 DevKit v1 (WROOM-32)
 * IDE:        VS Code + PlatformIO
 * Файл:       src/main.cpp (єдиний файл)
 *
 * Функції:
 * - Modbus RTU зчитування телеметрії Deye SUN-3K-SG04LP1-EU
 * - Визначення режиму M1-M6 (Розділ 3.1 диплому)
 * - Пріоритизація навантажень за SoC (3 групи реле)
 * - Прогноз часу автономії (формула з Розділу 3.3.1)
 * - Веб-дашборд з REST API (http://deye-monitor.local)
 * - Журнал подій у SPIFFS (CSV)
 *
 * Бібліотеки (platformio.ini):
 * - ModbusMaster (4-20ma)
 * - ArduinoJson (bblanchon, v6)
 * ===== */

#include <Arduino.h>
#include <WiFi.h>
#include <WebServer.h>
#include <ESPmDNS.h>
#include <SPIFFS.h>
#include <ModbusMaster.h>
#include <ArduinoJson.h>
#include <HardwareSerial.h>
#include <time.h>

// =====
// НАЛАШТУВАННЯ — ЗМІНИТИ ПІД СВОЮ МЕРЕЖУ
// =====
#define WIFI_SSID      "YOUR_WIFI_SSID"
#define WIFI_PASS      "YOUR_WIFI_PASSWORD"
#define HOSTNAME        "deye-monitor"

// RS485 / Modbus RTU (ESP32 UART2 → MAX485 → Deye RS485-порт)
#define RS485_RX        16      // UART2 RX → MAX485 RO
#define RS485_TX        17      // UART2 TX → MAX485 DI
#define RS485_DE        4       // DE/RE → MAX485 DE+RE
#define MODBUS_BAUD     9600
#define MODBUS_ADDR     1       // Slave ID Deye (зазвичай 1)

// Реле груп навантажень (через оптоізований модуль реле)
#define PIN_RELAY_G1    25      // Група 1 — критичні (холодильник, світло, роутер)
#define PIN_RELAY_G2    26      // Група 2 — некритичні (ноутбук, ТВ)
#define PIN_RELAY_G3    27      // Група 3 — додаткові (зарядки тощо)

// Пороги SoC для пріоритизації (%)
```

```

#define TH_G3_OFF      60      // < 60 % → Група 3 ВИМК
#define TH_G2_OFF      35      // < 35 % → Група 2 ВИМК
#define TH_CUTOFF      10      // ≤ 10 % → M5, все ВИМК (BMS)

// Параметри системи (з диплому)
#define P_OVERLOAD      3000    // Вт, поріг M6
#define ETA_TRACT      0.956f   //  $\eta_{\text{стаб}} \times \eta_{\text{інв}} = 0.98 \times 0.976$ 
#define BAT_WH          5120.0f // 100 А·год × 51.2 В
#define DOD             0.90f   // глибина розряду LiFePO4

// Інтервали
#define POLL_MS          5000    // опитування Modbus
#define LOG_MS           60000   // запис журналу
#define LOG_MAX          262144  // 256 КБ ротація SPIFFS

// =====
// MODBUS REGISTRI Deye SUN-3K-SG04LP1-EU
// (Deye Modbus Communication Protocol v1.x)
// =====
enum DeyeReg : uint16_t {
    R_INV_STATUS      = 0x003B,    // 59   статус інвертора
    R_GRID_V           = 0x0049,    // 73   напруга мережі L1           ×0.1 В
    R_GRID_HZ          = 0x004A,    // 74   частота мережі             ×0.01 Гц
    R_DAILY_CHG        = 0x0060,    // 96   енергія заряду за добу      ×0.1
    кВт·год
    R_DAILY_DIS        = 0x0062,    // 98   енергія розряду за добу     ×0.1
    кВт·год
    R_GRID_W           = 0x006D,    // 109  потужність від мережі       Вт (signed)
    R_AC_V_OUT         = 0x00AC,    // 172  вихідна напруга АС          ×0.1 В
    R_AC_HZ_OUT        = 0x00AD,    // 173  вихідна частота             ×0.01 Гц
    R_LOAD_W           = 0x00AF,    // 175  потужність навантаження     Вт
    R_PV_W             = 0x00B7,    // 183  потужність PV               Вт
    R_SOC              = 0x00B8,    // 184  SoC батареї                 %
    R_BAT_V            = 0x00B9,    // 185  напруга АКБ                 ×0.1 В
    R_BAT_A            = 0x00BA,    // 186  струм АКБ (signed)          ×0.1 А
    R_BAT_W            = 0x00BE,    // 190  потужність АКБ (signed)     Вт
    R_BAT_T            = 0x00C0,    // 192  температура АКБ            ×0.1 °C
};

// =====
// СТАН СИСТЕМИ
// =====
struct State {
    // батарея
    uint16_t soc;           // %
    float batV;            // В
    float batA;            // А (+ заряд / - розряд)
    int16_t batW;          // Вт
    float batT;            // °C
    // мережа / інвертор
    float gridV;           // В
    float gridHz;          // Гц
    int16_t gridW;         // Вт
    float acVout;          // В
    float acHzOut;         // Гц
    uint16_t loadW;        // Вт
    uint16_t pvW;          // Вт
    uint16_t invStat;
    // розрахункові
    float autonomy;        // год

```

```

uint8_t  mode;           // 1..6 (M1..M6)
bool     gridOk;         // мережа є
// добова енергія
float    dayChg;         // кВт·год
float    dayDis;         // кВт·год
// реле
bool     g1, g2, g3;
// сервісні
unsigned long ts;        // millis останнього оновлення
bool     mbOk;           // Modbus працює
uint32_t mbErr;          // лічильник помилок
} S = {};

static const char *MODES[] = {
    "---",                // 0
    "M1 - Мережа + Заряд", // 1
    "M2 - Мережа (АКБ повна)", // 2
    "M3 - Автономний (UPS)", // 3
    "M4 - Відновлення",     // 4
    "M5 - АВАРІЯ: глиб. розряд", // 5
    "M6 - АВАРІЯ: перевантаження", // 6
};

// =====
// ГЛОБАЛЬНІ ОБ'ЄКТИ
// =====
HardwareSerial rs(2);      // UART2
ModbusMaster   mb;
WebServer      srv(80);

// RS485 напрямок
void txOn() { digitalWrite(RS485_DE, HIGH); }
void txOff() { digitalWrite(RS485_DE, LOW); }

// =====
// MODBUS: ЗЧИТУВАННЯ РЕГІСТРІВ DEYE
// =====
static bool mbRead(uint16_t reg, uint16_t cnt, uint16_t *buf) {
    uint8_t r = mb.readHoldingRegisters(reg, cnt);
    if (r != mb.ku8MBSuccess) { S.mbErr++; return false; }
    for (uint16_t i = 0; i < cnt; i++) buf[i] = mb.getResponseBuffer(i);
    return true;
}

bool pollDeye() {
    uint16_t d[10];
    bool ok = true;

    // Блок батареї: PV_W(0xB7)..BAT_T(0xC0) - 10 регістрів
    if (mbRead(R_PV_W, 10, d)) {
        S.pvW = d[0];           // 0xB7
        S.soc = d[1];           // 0xB8
        S.batV = d[2] * 0.1f;    // 0xB9
        S.batA = (int16_t)d[3] * 0.1f; // 0xBA
        S.batW = (int16_t)d[7];    // 0xBE
        S.batT = (int16_t)d[9] * 0.1f; // 0xC0
    } else ok = false;

    // Мережа: напруга + частота
    if (mbRead(R_GRID_V, 2, d)) {

```

```

    S.gridV = d[0] * 0.1f;
    S.gridHz = d[1] * 0.01f;
} else ok = false;

// Потужність мережі
if (mbRead(R_GRID_W, 1, d))
    S.gridW = (int16_t)d[0];

// Навантаження
if (mbRead(R_LOAD_W, 1, d))
    S.loadW = d[0];

// Вихід інвертора
if (mbRead(R_AC_V_OUT, 2, d)) {
    S.acVout = d[0] * 0.1f;
    S.acHzOut = d[1] * 0.01f;
}

// Статус
if (mbRead(R_INV_STATUS, 1, d))
    S.invStat = d[0];

// Добова енергія
if (mbRead(R_DAILY_CHG, 1, d))
    S.dayChg = d[0] * 0.1f;
if (mbRead(R_DAILY_DIS, 1, d))
    S.dayDis = d[0] * 0.1f;

S.ts = millis();
S.mbOk = ok;
return ok;
}

// =====
// АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМУ (Розд. 3.1, Табл. 3.1)
// =====
static uint8_t prevMode = 0;

uint8_t calcMode() {
    S.gridOk = (S.gridV > 170.0f); // поріг з диплому

    if (S.soc <= TH_CUTOFF) return 5; // M5 – глибокий розряд
    if (S.loadW > P_OVERLOAD) return 6; // M6 – перевантаження
    if (!S.gridOk) return 3; // M3 – автономний UPS
    if (S.soc >= 100) return 2; // M2 – АКБ повна

    // M1 або M4
    if (prevMode == 3 || prevMode == 5)
        return 4; // M4 – відновлення

    return 1; // M1 – мережа + заряд
}

// =====
// ПРИОРИТИЗАЦІЯ НАВАНТАЖЕНЬ (унікальна функція, відсутня у Deye)
// =====
void setRelay(uint8_t pin, bool &cur, bool next) {
    if (cur != next) { cur = next; digitalWrite(pin, next ? HIGH : LOW); }
}

```

```

void applyPriority() {
    bool e1 = true, e2 = true, e3 = true;

    if (S.mode == 5) {
        e1 = e2 = e3 = false;           // M5 – все вимк
    } else if (S.mode == 3) {
        // Автономний – пріоритизація за SoC
        e1 = true;                       // критичні завжди
        e2 = (S.soc >= TH_G2_OFF);       // вимк < 35 %
        e3 = (S.soc >= TH_G3_OFF);       // вимк < 60 %
    }
    // M1/M2/M4 – мережа є, все увімк (e1=e2=e3=true за замовч.)

    setRelay(PIN_RELAY_G1, S.g1, e1);
    setRelay(PIN_RELAY_G2, S.g2, e2);
    setRelay(PIN_RELAY_G3, S.g3, e3);
}

// =====
// ПРОГНОЗ АВТОНОМІЇ (Розд. 3.3.1)
// t = E_залишкова / (P_нав / η_тракту)
// =====
float calcAutonomy() {
    if (S.loadW < 5) return 99.9f;
    float usable = ((float)S.soc / 100.0f) - ((float)TH_CUTOFF / 100.0f);
    if (usable <= 0.0f) return 0.0f;
    float eAvail = BAT_WH * usable * DOD;
    return eAvail / ((float)S.loadW / ETA_TRACT);
}

// =====
// ЖУРНАЛ ПОДІЙ – SPIFFS (CSV)
// =====
#define LOG_PATH "/journal.csv"
static const char LOG_HDR[] PROGMEM =
    "timestamp,soc_%,bat_v,bat_a,bat_w,bat_temp,grid_v,grid_hz,"
    "grid_w,load_w,pv_w,g1,g2,g3,mode,autonomy_h\n";

void logWrite() {
    // потація
    File f = SPIFFS.open(LOG_PATH, "r");
    if (f) {
        if (f.size() > LOG_MAX) { f.close(); SPIFFS.remove(LOG_PATH); }
        else f.close();
    }

    f = SPIFFS.open(LOG_PATH, "a");
    if (!f) return;

    if (f.size() == 0) f.print(FPSTR(LOG_HDR));

    struct tm ti;
    char ts[24] = "0000-00-00T00:00:00";
    if (getLocalTime(&ti, 100))
        strftime(ts, sizeof(ts), "%Y-%m-%dT%H:%M:%S", &ti);

    char row[256];
    snprintf(row, sizeof(row),
        "%s,%u,%.1f,%.1f,%d,%.1f,%.1f,%.2f,%d,%u,%u,%d,%d,%d,%u,%.2f\n",
        ts, S.soc, S.batV, S.batA, S.batW, S.batT,

```

```

        S.gridV, S.gridHz, S.gridW, S.loadW, S.pvW,
        S.g1, S.g2, S.g3, S.mode, S.autonomy);
    f.print(row);
    f.close();
}

// =====
//  REST API  /api/state → JSON
//  =====
void apiState() {
    StaticJsonDocument<768> j;
    j["soc"] = S.soc;
    j["bat_v"] = serialized(String(S.batV, 1));
    j["bat_a"] = serialized(String(S.batA, 1));
    j["bat_w"] = S.batW;
    j["bat_temp"] = serialized(String(S.batT, 1));
    j["grid_v"] = serialized(String(S.gridV, 1));
    j["grid_hz"] = serialized(String(S.gridHz, 2));
    j["grid_w"] = S.gridW;
    j["load_w"] = S.loadW;
    j["pv_w"] = S.pvW;
    j["ac_v"] = serialized(String(S.acVout, 1));
    j["ac_hz"] = serialized(String(S.acHzOut, 2));
    j["mode"] = S.mode;
    j["mode_name"] = MODES[S.mode];
    j["grid_ok"] = S.gridOk;
    j["g1"] = S.g1;
    j["g2"] = S.g2;
    j["g3"] = S.g3;
    j["autonomy_h"] = serialized(String(S.autonomy, 2));
    j["mb_ok"] = S.mbOk;
    j["mb_err"] = S.mbErr;
    j["day_chg"] = serialized(String(S.dayChg, 2));
    j["day_dis"] = serialized(String(S.dayDis, 2));
    j["uptime_s"] = millis() / 1000;
    String out; serializeJson(j, out);
    srv.sendHeader("Access-Control-Allow-Origin", "*");
    srv.send(200, "application/json", out);
}

// =====
//  REST API  /api/relay?group=2&state=1
//  =====
void apiRelay() {
    if (!srv.hasArg("group") || !srv.hasArg("state")) {
        srv.send(400, "application/json", R("{\"error\":\"need group & state\"}"));
        return;
    }
    int gr = srv.arg("group").toInt();
    bool st = srv.arg("state") == "1";
    switch (gr) {
        case 1: setRelay(PIN_RELAY_G1, S.g1, st); break;
        case 2: setRelay(PIN_RELAY_G2, S.g2, st); break;
        case 3: setRelay(PIN_RELAY_G3, S.g3, st); break;
        default: srv.send(400, "application/json", R("{\"error\":\"group 1-3\"}")); return;
    }
    srv.send(200, "application/json", R("{\"ok\":true}"));
}

```

```
// =====
//  REST API  /api/log/download → CSV файл
//  =====
void apiLogDownload() {
    File f = SPIFFS.open(LOG_PATH, "r");
    if (!f) { srv.send(404, "text/plain", "no log"); return; }
    srv.setHeader("Content-Disposition", "attachment;
filename=journal.csv");
    srv.streamFile(f, "text/csv");
    f.close();
}

// =====
//  REST API  /api/log?last=20 → останні N рядків JSON
//  =====
void apiLogJson() {
    int want = srv.hasArg("last") ? srv.arg("last").toInt() : 20;
    if (want < 1) want = 1;
    if (want > 100) want = 100;

    File f = SPIFFS.open(LOG_PATH, "r");
    if (!f) { srv.send(200, "application/json", "[]"); return; }

    // зчитуємо рядки, тримаємо лише останні `want`
    String lines[100];
    int total = 0;
    bool first = true;
    while (f.available()) {
        String ln = f.readStringUntil('\n');
        ln.trim();
        if (first) { first = false; continue; } // пропускаємо заголовок
        if (ln.length() < 10) continue;
        lines[total % 100] = ln;
        total++;
    }
    f.close();

    int count = min(want, total);
    int start = total - count;

    DynamicJsonDocument doc(8192);
    JsonArray arr = doc.to<JsonArray>();
    for (int i = start; i < total; i++) {
        String &raw = lines[i % 100];
        // розбиваємо CSV: ts,soc,...,mode,autonomy
        int p = 0; String tok[16];
        int from = 0;
        for (int k = 0; k < 16 && from <= (int)raw.length(); k++) {
            int comma = raw.indexOf(',', from);
            if (comma < 0) comma = raw.length();
            tok[k] = raw.substring(from, comma);
            from = comma + 1;
            p = k;
        }
        if (p < 15) continue;
        JsonObject o = arr.createNestedObject();
        o["ts"] = tok[0];
        o["soc"] = tok[1].toInt();
        o["bat_w"] = tok[4].toInt();
    }
}
```

```

        o["load_w"]      = tok[9].toInt();
        int m = tok[14].toInt();
        o["mode"]        = m;
        o["mode_name"]   = (m >= 0 && m <= 6) ? MODES[m] : "?";
        o["autonomy_h"]  = tok[15];
    }
    String out; serializeJson(doc, out);
    srv.sendHeader("Access-Control-Allow-Origin", "*");
    srv.send(200, "application/json", out);
}

// =====
//  REST API  /api/info
//  =====
void apiInfo() {
    StaticJsonDocument<256> j;
    j["fw"]      = "1.0.0";
    j["device"]  = "ESP32-DEYE-MONITOR";
    j["thesis"]  = "Tsapchuk E.V., KPI 2026";
    j["heap"]    = ESP.getFreeHeap();
    j["uptime_s"] = millis() / 1000;
    j["spiffs_used"] = SPIFFS.usedBytes();
    j["spiffs_tot"] = SPIFFS.totalBytes();
    String out; serializeJson(j, out);
    srv.send(200, "application/json", out);
}

// =====
//  БЕБ-ДАШБОРД  (вбудований HTML+CSS+JS, без залежностей)
//  =====
static const char PAGE[] PROGMEM = R"rawhtml(
<!DOCTYPE html><html lang="uk"><head>
<meta charset="UTF-8">
<meta name="viewport" content="width=device-width,initial-scale=1">
<title>Моніторинг – Резервне електропостачання</title>
<style>
:root{--bg:#0d1117;--c:#161b22;--bd:#30363d;--t:#e6edf3;--m:#8b949e;
--g:#3fb950;--y:#d29922;--r:#f85149;--b:#58a6ff;--o:#ffa657}
*{box-sizing:border-box;margin:0;padding:0}
body{background:var(--bg);color:var(--t);font-family:'Segoe UI',system-
ui,sans-serif;padding:12px}
h1{font-size:1.15rem;color:var(--b);text-align:center;margin-bottom:4px}
.sub{text-align:center;color:var(--m);font-size:.72rem;margin-
bottom:16px}
.g{display:grid;grid-template-columns:repeat(auto-
fill,minmax(220px,1fr));gap:10px}
.k{background:var(--c);border:1px solid var(--bd);border-
radius:8px;padding:14px}
.kt{font-size:.65rem;color:var(--m);text-transform:uppercase;letter-
spacing:.04em;margin-bottom:6px}
.v{font-size:1.9rem;font-weight:700;line-height:1}
.u{font-size:.85rem;color:var(--m);margin-left:3px}
.s{font-size:.72rem;color:var(--m);margin-top:3px}
.bar{background:#21262d;border-radius:4px;height:7px;margin-
top:6px;overflow:hidden}
.fill{height:100%;border-radius:4px;transition:width .4s}
.badge{display:inline-block;padding:3px 9px;border-radius:10px;font-
size:.7rem;font-weight:600}
.m1,.m2{background:rgba(63,185,80,.12);color:var(--g)}
.m3,.m4{background:rgba(88,166,255,.12);color:var(--b)}

```

```

.m5,.m6{background:rgba(248,81,73,.12);color:var(--r)}
.rr{display:flex;gap:6px;flex-wrap:wrap;margin-top:6px}
.rl{flex:1;min-width:60px;padding:7px;border-radius:5px;text-align:center;font-size:.65rem;font-weight:600}
.rl.on{background:rgba(63,185,80,.15);color:var(--g);border:1px solid var(--g)}
.rl.off{background:rgba(248,81,73,.08);color:var(--r);border:1px solid var(--r)}
.dot{display:inline-block;width:7px;height:7px;border-radius:50%;margin-right:5px}
.dok{background:var(--g)}.der{background:var(--r)}.dw{background:var(--y)}
.btn{padding:5px 12px;border-radius:5px;border:1px solid var(--bd);background:var(--c);color:var(--t);cursor:pointer;font-size:.75rem}
.btn:hover{border-color:var(--b)}
.top{display:flex;gap:6px;margin-bottom:12px;flex-wrap:wrap;align-items:center}
.tag{font-size:.65rem;color:var(--m);background:#21262d;padding:2px 7px;border-radius:8px}
.tbl{width:100%;border-collapse:collapse;font-size:.68rem;margin-top:6px}
.tbl th{color:var(--m);text-align:left;padding:3px 6px;border-bottom:1px solid var(--bd)}
.tbl td{padding:3px 6px;border-bottom:1px solid #21262d}
canvas{width:100%;margin-top:6px}
.w2{grid-column:span 2}
@media(max-width:520px){.v{font-size:1.4rem}.g{grid-template-columns:1fr}.w2{grid-column:span 1}}
</style></head><body>

```

<h1>⚡ Система резервного электропостачання</h1>

<p class="sub">Deye SUN-3K + SE-G5.1 Pro-B | ESP32 Modbus RTU | КПИ 2026, Цапчук Е.В.</p>

```

<div class="top">
  <span id="cd"><span class="dot" dw id="cdd"></span><span id="cdt">...</span></span>
  <span class="tag" id="tt"></span>
  <button class="btn" onclick="go()">&#8635; Оновити</button>
  <a href="/api/log/download" class="btn">&#11015; CSV</a>
</div>

```

```

<div class="g">
  <!-- Режим -->
  <div class="k">
    <div class="kt">Режим роботи</div>
    <div style="margin-bottom:6px"><span id="mb" class="badge">—
  </span></div>
    <div class="s" id="gs"></div>
    <div class="s" id="au"></div>
  </div>
  <!-- SoC -->
  <div class="k">
    <div class="kt">Заряд АКБ (SoC)</div>
    <div><span class="v" id="sv"></span><span class="u">%</span></div>
    <div class="bar"><div class="fill" id="sb" style="width:0%;background:var(--g)"></div></div>
    <div class="s" id="bv"></div>
    <div class="s" id="bt"></div>
  </div>
  <!-- Батарея -->

```

```

<div class="k">
  <div class="kt">Батарея</div>
  <div><span class="v" id="bw">—</span><span class="u">Вт</span></div>
  <div class="s" id="ba">—</div>
  <div class="s" id="bd">—</div>
</div>
<!-- Навантаження -->
<div class="k">
  <div class="kt">Навантаження</div>
  <div><span class="v" id="lw">—</span><span class="u">Вт</span></div>
  <div class="s" id="lp">—</div>
</div>
<!-- Мережа -->
<div class="k">
  <div class="kt">Мережа (вхід)</div>
  <div><span class="v" id="gv">—</span><span class="u">В</span></div>
  <div class="s" id="gh">—</div>
  <div class="s" id="gw">—</div>
</div>
<!-- Вихід АС -->
<div class="k">
  <div class="kt">Вихід АС</div>
  <div><span class="v" id="av">—</span><span class="u">В</span></div>
  <div class="s" id="ah">—</div>
  <div class="s" id="pw">—</div>
</div>
<!-- Реле -->
<div class="k w2">
  <div class="kt">Групи навантажень (пріоритизація)</div>
  <div class="rr">
    <div class="rl" id="r1">Гр.1<br><small>Критичні</small></div>
    <div class="rl" id="r2">Гр.2<br><small>Некритичні</small></div>
    <div class="rl" id="r3">Гр.3<br><small>Додаткові</small></div>
  </div>
  <div class="s" style="margin-top:6px">SoC<math>\leq 60\% \rightarrow \text{Гр.3 вимк}</math>
  <math>\text{SoC} \leq 35\% \rightarrow \text{Гр.2 вимк}</math> <math>\text{SoC} \leq 10\% \rightarrow \text{все вимк}</math>
  (M5)</div>
</div>
<!-- Modbus -->
<div class="k">
  <div class="kt">Modbus RTU</div>
  <div id="ms">—</div>
  <div class="s" id="me">—</div>
</div>
</div>

<!-- Графік -->
<div class="k" style="margin-top:10px">
  <div class="kt">SoC за останню годину</div>
  <canvas id="ch" height="70"></canvas>
</div>

<!-- Журнал -->
<div class="k" style="margin-top:10px">
  <div class="kt">Останні записи</div>
  <table class="tbl"><thead><tr>
<th>Час</th><th>SoC</th><th>Нав.</th><th>АКБ</th><th>Режим</th><th>Авт.</th>

```

```

</tr></thead><tbody id="lb"><tr><td colspan="6" style="text-align:center;color:var(--m)">...</td></tr></tbody></table>
</div>

<script>
const H=[];
function dc(d){
  const c=document.getElementById('ch'),x=c.getContext('2d');
  const W=c.offsetWidth,HH=70;c.width=W;c.height=HH;
  x.clearRect(0,0,W,HH);if(d.length<2)return;
  const sy=v=>HH-4-v/100*(HH-8);
  x.fillStyle='rgba(248,81,73,.06)';x.fillRect(0,sy(35),W,sy(0)-sy(35));
  x.fillStyle='rgba(210,153,34,.06)';x.fillRect(0,sy(60),W,sy(35)-sy(60));
  x.beginPath();x.strokeStyle='#58a6ff';x.lineWidth=2;
  d.forEach((v,i)=>{const px=i*(W/(d.length-1));i?x.lineTo(px,sy(v)):x.moveTo(px,sy(v))});
  x.stroke();
  x.font='9px monospace';
  x.fillStyle='rgba(210,153,34,.6)';x.fillText('60%',W-26,sy(60)-2);
  x.fillStyle='rgba(248,81,73,.6)';x.fillText('35%',W-26,sy(35)-2);
}

function up(d){
  const soc=d.soc;
  document.getElementById('sv').textContent=soc;
  const b=document.getElementById('sb');
  b.style.width=soc+'%';
  b.style.background=soc>60?'var(--g)':soc>35?'var(--y)':'var(--r)';
  document.getElementById('bv').textContent=d.bat_v+' B';
  document.getElementById('bt').textContent='Температура: '+d.bat_temp+' °C';

  const bs=d.bat_w>0?'↑ Заряд':'↓ Розряд';
  document.getElementById('bw').textContent=Math.abs(d.bat_w);
  document.getElementById('ba').textContent=bs+' '+Math.abs(parseFloat(d.bat_a))+' A';
  document.getElementById('bd').textContent='Доба: '+d.day_chg+' / - '+d.day_dis+' кВт·год';

  document.getElementById('lw').textContent=d.load_w;

  document.getElementById('lp').textContent=((d.load_w/3000)*100).toFixed(0)+'% від 3000 Вт';

  document.getElementById('gv').textContent=d.grid_v;
  document.getElementById('gh').textContent=d.grid_hz+' Гц';
  document.getElementById('gw').textContent='Потужність: '+d.grid_w+' Вт';

  document.getElementById('av').textContent=d.ac_v;
  document.getElementById('ah').textContent=d.ac_hz+' Гц (вихід)';
  document.getElementById('pw').textContent=d.pv_w>0?'PV: '+d.pv_w+' Вт':'PV: -';

  const m=d.mode;
  const badge=document.getElementById('mb');
  badge.textContent=d.mode_name;badge.className='badge m'+m;
  document.getElementById('gs').textContent=d.grid_ok?'✓ Мережа є':'X Мережа відсутня';
  document.getElementById('au').textContent=m==3?'□ Автономія ≈ '+d.autonomy_h+' год':'';

```

```

['r1','r2','r3'].forEach((id,i)=>{
  const on=d['g'+(i+1)];
  document.getElementById(id).className='r1 '+ (on?'on':'off');
});

const ms=document.getElementById('ms');
ms.innerHTML=d.mb_ok?'<span class="dot dok"></span>OK': '<span class="dot
der"></span>ПОМИЛКА';
document.getElementById('me').textContent='Помилка: '+d.mb_err;
document.getElementById('tt').textContent=new
Date().toLocaleTimeString('uk-UA');

H.push(soc);if (H.length>60)H.shift();dc(H);
}

async function go(){
  try{
    const r=await fetch('/api/state');
    if(!r.ok)throw 0;
    up(await r.json());
    document.getElementById('cdd').className='dot dok';
    document.getElementById('cdt').textContent="З'єднано";
  }catch(e){
    document.getElementById('cdd').className='dot der';
    document.getElementById('cdt').textContent='Помилка';
  }
}

async function gl(){
  try{
    const r=await fetch('/api/log?last=8');if(!r.ok)return;
    const rows=await r.json();
    const tb=document.getElementById('lb');tb.innerHTML='';
    rows.forEach(w=>{
      const tr=document.createElement('tr');

tr.innerHTML='<td>'+w.ts+'</td><td>'+w.soc+'</td><td>'+w.load_w+'</td><td
>'+w.bat_w+'</td><td>'+w.mode_name+'</td><td>'+w.autonomy_h+'</td>';
      tb.appendChild(tr);
    });
  }catch(e){}
}

go();gl();setInterval(go,5000);setInterval(gl,30000);
</script></body></html>
)rawhtml";

// =====
//  РЕЄСТРАЦІЯ МАПШПУТІВ
//  =====
void routes() {
  srv.on("/", HTTP_GET, []() { srv.send_P(200, "text/html",
PAGE); });
  srv.on("/api/state", HTTP_GET, apiState);
  srv.on("/api/relay", HTTP_POST, apiRelay);
  srv.on("/api/log", HTTP_GET, apiLogJson);
  srv.on("/api/log/download", HTTP_GET, apiLogDownload);
  srv.on("/api/log/clear", HTTP_DELETE, []() {
    SPIFFS.remove(LOG_PATH);

```

```

    srv.send(200, "application/json", R("{\"ok\":true}"));
  });
  srv.on("/api/info", HTTP_GET, apiInfo);
  srv.onNotFound([]() { srv.send(404, "text/plain", "404"); });
}

// =====
//  SETUP
//  =====
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Serial.println("\n=== Deye Monitor v1.0 | Tsapchuk E.V., KPI 2026 ===");

  // Реле
  pinMode(PIN_RELAY_G1, OUTPUT); digitalWrite(PIN_RELAY_G1, LOW);
  pinMode(PIN_RELAY_G2, OUTPUT); digitalWrite(PIN_RELAY_G2, LOW);
  pinMode(PIN_RELAY_G3, OUTPUT); digitalWrite(PIN_RELAY_G3, LOW);

  // RS485
  pinMode(RS485_DE, OUTPUT); digitalWrite(RS485_DE, LOW);
  rs.begin(MODBUS_BAUD, SERIAL_8N1, RS485_RX, RS485_TX);
  mb.begin(MODBUS_ADDR, rs);
  mb.preTransmission(txOn);
  mb.postTransmission(txOff);
  Serial.printf("[MB] addr=%d baud=%d\n", MODBUS_ADDR, MODBUS_BAUD);

  // SPIFFS
  if (!SPIFFS.begin(true)) { SPIFFS.format(); SPIFFS.begin(true); }
  Serial.printf("[FS]    %u    /    %u    bytes\n", SPIFFS.usedBytes(),
    SPIFFS.totalBytes());

  // Wi-Fi
  WiFi.mode(WIFI_STA);
  WiFi.setHostname(HOSTNAME);
  WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASS);
  Serial.printf("[WiFi] %s ", WIFI_SSID);
  unsigned long t0 = millis();
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && millis() - t0 < 15000) {
    delay(400); Serial.print('.');
  }
  Serial.println();
  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
    Serial.printf("[WiFi]      OK                IP:          %s\n",
      WiFi.localIP().toString().c_str());
  } else {
    Serial.println("[WiFi] FAIL - offline mode");
  }

  // mDNS
  if (MDNS.begin(HOSTNAME))
    Serial.printf("[mDNS] http://%s.local\n", HOSTNAME);

  // NTP (Київ: UTC+2, літній +1)
  configTime(2 * 3600, 3600, "pool.ntp.org", "time.google.com");

  // HTTP
  routes();
  srv.begin();
  Serial.println("[HTTP] port 80 OK");
}

```

```

// Перше опитування
if (pollDeye()) {
    S.mode      = calcMode();
    S.autonomy  = calcAutonomy();
    applyPriority();
    Serial.printf("[OK] SoC=%u%% Load=%uW Mode=%s\n",
        S.soc, S.loadW, MODES[S.mode]);
} else {
    Serial.println("[MB] first poll FAIL");
}

Serial.println("=== init done ===\n");
}

// =====
// LOOP
// =====
void loop() {
    srv.handleClient();

    static unsigned long tPoll = 0, tLog = 0;

    // Опитування Modbus
    if (millis() - tPoll >= POLL_MS) {
        tPoll = millis();

        if (pollDeye()) {
            uint8_t m = calcMode();
            if (m != prevMode)
                Serial.printf("[MODE] %s -> %s\n", MODES[prevMode], MODES[m]);
            prevMode = m;
            S.mode      = m;
            S.autonomy  = calcAutonomy();
            applyPriority();

            Serial.printf("SoC:%u%% Ld:%uW Bat:%dW Grid:%.0fV %s Aut:%.1fh
G:%d%d%d\n",
                S.soc, S.loadW, S.batW, S.gridV,
                MODES[S.mode], S.autonomy,
                S.g1, S.g2, S.g3);
        }
    }

    // Журнал
    if (millis() - tLog >= LOG_MS) {
        tLog = millis();
        logWrite();
    }

    delay(1);
}

```