

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут екології, зеленої енергетики та сталого розвитку
Кафедра інформаційних технологій у відновлюваній енергетиці

До захисту допущено

Кафедрою інформаційних технологій у відновлюваній енергетиці протокол

№ _____ від _____

в.о. завідувача кафедри _____ Ілля МАРУЩЕНКО
(підпис) (ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2025 р.

Кваліфікаційна робота
здобувача Єгора РИБАЛЬЧЕНКО другого (магістерського) рівня вищої освіти

Проектування портативних сонячних електростанцій
(назва роботи)

Спеціальність (спеціалізація) 105 Прикладна фізика та наноматеріали
(код та найменування спеціальності; спеціалізації спеціальності - за наявності)

Освітня програма Прикладна фізика нетрадиційної енергетики
(назва освітньої програми)

Виконавець _____ Єгор РИБАЛЬЧЕНКО
(підпис) (ім'я, прізвище)

Науковий керівник _____ Ігор КУДРЯВЦЕВ
(підпис) (ім'я, прізвище)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Навчально-науковий інститут екології, зеленої енергетики та сталого розвитку

Кафедра інформаційних технологій у відновлюваній енергетиці

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр

Спеціальність 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Ілля МАРУЩЕНКО
(підпис)

“ _____ ” _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Рибальченко Єгора Сергійовича

Тема роботи: «Проектування портативних сонячних електростанцій»

керівник роботи: Кудрявцев Ігор Миколайович, доцент

Затверджено наказом по університету від 25 листопада 2025 року № 3401-5/4196

1. Строк подання студентом роботи 01.12.2025 р.
2. Перелік питань, які потрібно розробити:
 - ознайомитися з науковою літературою за темою дослідження;
 - сформулювати завдання на дипломну роботу;
 - провести аналіз спеціальної літератури та сформулювати постановку наукової/науково-технічної задачі;
 - обрати методи та методики досліджень і скласти програму виконання роботи;

- провести самостійні дослідження фізичних систем із застосуванням експериментальних, теоретичних та чисельно-комп'ютерних методів;
- проаналізувати результати, оформити їх презентацію та оформити магістерську роботу.

План роботи:

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вибір теми кваліфікаційної роботи
2	Затвердження теми на кафедрі
3	Робота з літературними та іншими джерелами
4	Написання вступу до роботи та першого розділу
5	Написання другого розділу
6	Написання третього розділу
7	Завершення написання кваліфікаційної роботи (висновки та література)
8	Подача науковому керівнику
9	Відгук, рецензія, підготовка до захисту
10	Попередній захист
11	Захист

Дата видачі завдання: 03 листопада 2025 року

Студент

підпис

Єгор РИБАЛЬЧЕНКО

Керівник роботи

підпис

Ігор КУДРЯВЦЕВ

РЕФЕРАТ

Рибальченко Єгор. «Проектування портативних сонячних електростанцій». Кваліфікаційна робота магістра з прикладної фізики. – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна - 57 с.

Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 13 рисунків, 1 таблиця, 45 використаних літературних джерел.

Об'єкт дослідження: портативні сонячні електростанції як інтегровані системи перетворення та накопичення електроенергії.

Мета дослідження: розробити та обґрунтувати комплексні підходи до проектування портативних сонячних електростанцій із підвищеною питомою енерговіддачею, безпечністю та надійністю, підтверджені теоретичними розрахунками, моделюванням і експериментальною валідацією.

Наукова новизна отриманих: запропоновано інтегровану методику проектування портативних СЕС, що поєднує фізичні моделі фотоелектричного перетворення, алгоритмічні особливості МРРТ-контролерів, вибір параметрів акумуляторного блока та тепломеханічні обмеження в єдиному енергетичному балансі, а також у формулюванні критеріїв оптимізації конфігурації станції для польових умов експлуатації.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: портативна сонячна електростанція, фотоенергетика, енергобаланс, МРРТ-контролер, LiFePO_4 -акумулятор, енергоефективність, тепломеханічний дизайн.

ABSTRACT

Rybalchenko Yehor. “Design of Portable Solar Power Stations”. Master's thesis in applied physics. – V. N. Karazin Kharkiv National University – 57 pp.

The thesis consists of an introduction, three chapters, a conclusion, and a list of references. The thesis contains 13 figures, 1 table and 45 references.

Object of study: portable solar power stations as integrated systems for energy conversion and storage.

The purpose of the study: to develop and substantiate comprehensive approaches to the design of portable solar power stations with enhanced specific energy output, safety, and reliability, confirmed by theoretical calculations, modeling, and experimental validation.

Scientific novelty of the results obtained: proposal of an integrated methodology for designing portable solar power stations that combines physical models of photovoltaic conversion, algorithmic features of MPPT controllers, selection of battery pack parameters, and thermomechanical constraints within a unified energy balance, as well as in formulating optimization criteria for station configuration under field operating conditions.

KEYWORDS: portable solar power station, photovoltaics, energy balance, MPPT controller, LiFePO₄ battery, energy efficiency, thermomechanical design.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ТЕОРІЯ ОГЛЯД РІШЕНЬ ДЛЯ ПОРТАТИВНИХ СЕС	6
1.1. Фізичні основи фотоенергетики та ВА-характеристики модулів	6
1.2. Архітектури й компоненти портативних систем: фотомодулі, MPPT- контролери, акумуляторні батареї, інвертори, системи BMS	9
1.3. Нормативи і безпека: стандарти ІЕС, випробування UN38.3, ступені ІР-захисту, електромагнітна сумісність; огляд сучасних рішень	15
РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНКИ ПОРТАТИВНОЇ СТАНЦІЇ	21
2.1. Вимоги технічного завдання, сценарії використання та енергобаланс	21
2.2. Розрахунок і вибір фотомодулів, алгоритмів MPPT та акумуляторного блока	25
2.3. Схемотехніка, тепломеханічний дизайн, надійність і техніко- економічна оцінка	29
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТИ ТА ПРАКТИЧНА ВАЛІДАЦІЯ	36
3.1. Макети та вимірювальний стенд: методики випробувань	36
3.2. Результати стендових і польових тестів, аналіз похибок	42
3.3. Порівняння з розрахунками, оптимізація конструкції та дорожня карта впровадження	45
ВИСНОВКИ	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	52

ВСТУП

Актуальність теми. Стрімке зростання попиту на автономні джерела живлення для критичної інфраструктури, польових досліджень, військово-рятувальних операцій, медицини «в полі», ІТ-обладнання та побутових потреб зумовлює потребу у високоефективних портативних сонячних електростанціях. На відміну від стаціонарних СЕС, портативні рішення мають жорсткі обмеження за масою, габаритами, ударо-віброміцністю, температурною стабільністю та швидкістю розгортання. Ключовими викликами залишаються оптимальне енергетичне узгодження фотомодулів і силової електроніки (MPPT, DC/DC, інвертори), керування акумуляторними системами з урахуванням деградації та безпеки, а також тепловий і механічний дизайн у компактних корпусах. Саме інтегроване проєктування від фізичних моделей перетворення енергії до експериментальної валідації є вирішальним для підвищення питомої енерговіддачі й надійності портативних СЕС.

Мета дослідження. Розробити й обґрунтувати комплексні підходи до проєктування портативних сонячних електростанцій із підвищеною питомою енерговіддачею, безпечністю та надійністю, підтверджені теоретичними розрахунками, моделюванням і експериментальними випробуваннями.

Завдання дослідження.

1. Узагальнити фізичні засади фотоелектричного перетворення та побудувати робочі моделі ВА-характеристик модулів з урахуванням освітленості й температури.
2. Проаналізувати архітектури портативних СЕС і визначити вимоги до підсистем: PV-модулі, MPPT-контролери, DC/DC-перетворювачі, інвертори, BMS, акумулятори.
3. Розробити методику енергетичного балансу для типових сценаріїв використання і сформулювати вимоги технічного завдання до цільових конфігурацій.

4. Виконати розрахунок та вибір елементної бази, включно з алгоритмами MPPT та параметрами акумуляторних блоків з урахуванням деградації та теплових режимів.

5. Синтезувати електричні та функціональні схеми, розробити тепломеханічний дизайн і заходи електробезпеки.

6. Провести моделювання енергетичних втрат, теплових режимів і надійності (включно з FMEA-аналізом критичних вузлів).

7. Створити експериментальний макет, розробити вимірювальний стенд і програму випробувань, отримати експериментальні ВА-характеристики, КПД тракту та показники стабільності.

8. Зіставити результати експериментів із розрахунково-моделювальними даними, обґрунтувати оптимізацію конструкції й підготувати рекомендації до впровадження.

Об'єкт дослідження. Портативні сонячні електростанції як складні енергетичні системи перетворення та накопичення електроенергії.

Предмет дослідження. Фізико-технічні закономірності, методи проєктування та параметри компонентів портативних СЕС, що визначають енергоефективність, безпечність і надійність у мобільних застосунках.

Методи дослідження. Теоретичне узагальнення та аналітичні розрахунки у рамках фізичних моделей фотоелектричного перетворення; математичне та імітаційне моделювання енергетичних процесів і теплових режимів; схемотехнічний синтез силової електроніки; статистичні методи обробки експериментальних даних; експериментальні вимірювання ВА-характеристик, КПД перетворювачів, теплових параметрів, а також тестування автономної роботи за різних профілів навантаження. Для оцінювання надійності використано елементи FMEA/FTA; для зіставлення альтернатив техніко-економічну оцінку.

Наукова новизна.

Запропоновано інтегровану методику проєктування портативних СЕС, що поєднує фізичні моделі PV-ланцюга, алгоритмічні особливості MPPT та

тепломеханічні обмеження в єдиному енергетичному балансі. Уточнено підхід до вибору параметрів акумуляторного блока з урахуванням циклової й календарної деградації та теплового впливу в компактному корпусі. Показано можливість підвищення питомої енерговіддачі за рахунок погодженого добору топології силової електроніки та регламентів керування зарядом/розрядом із урахуванням реальних профілів навантаження.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені принципи та розрахунково-конструкторські рішення можуть бути використані під час створення комерційних зразків портативних СЕС, модернізації існуючих систем живлення для польових застосувань і навчально-лабораторних стендів. Методики балансу енергії, добору елементної бази та валідації результатів зменшують ризики недовиконання енергетичних показників і підвищують безпечність експлуатації.

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У першому розділі подано теоретичні засади та огляд сучасних рішень для портативних СЕС. У другому розділі викладено вимоги, моделювання, розрахунки та конструкторські рішення. У третьому розділі наведено експериментальні дослідження, результати валідації та пропозиції з оптимізації. Загальний обсяг становить 30–35 сторінок основного тексту, включно з ілюстративними матеріалами та таблицями.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ТЕОРІЯ ОГЛЯД РІШЕНЬ ДЛЯ ПОРТАТИВНИХ СЕС

1.1. Фізичні основи фотоенергетики та ВА-характеристики модулів

Базовим еталоном для порівнянь є стандартні умови випробувань. Випромінення $1\,000\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$, спектр AM1.5G, температура осередку $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. У реальних польових режимах ці параметри змінюються постійно, тому для швидких оцінок застосовують показник NOCT. Типове значення $42\text{--}48\text{ }^{\circ}\text{C}$ дає змогу оцінити, що при $800\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ і температурі довкілля $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура осередку сягає приблизно $52\text{--}58\text{ }^{\circ}\text{C}$. Саме температура визначає зміщення всієї ВА-кривої: струм короткого замикання зростає помітно слабше, ніж падає напруга холостого ходу, через збільшення струму насичення діода. Внаслідок цього максимальна потужність у сонячний полудень спадає на $10\text{--}20\%$ відносно стандартних умов навіть без тінювань і забруднення.

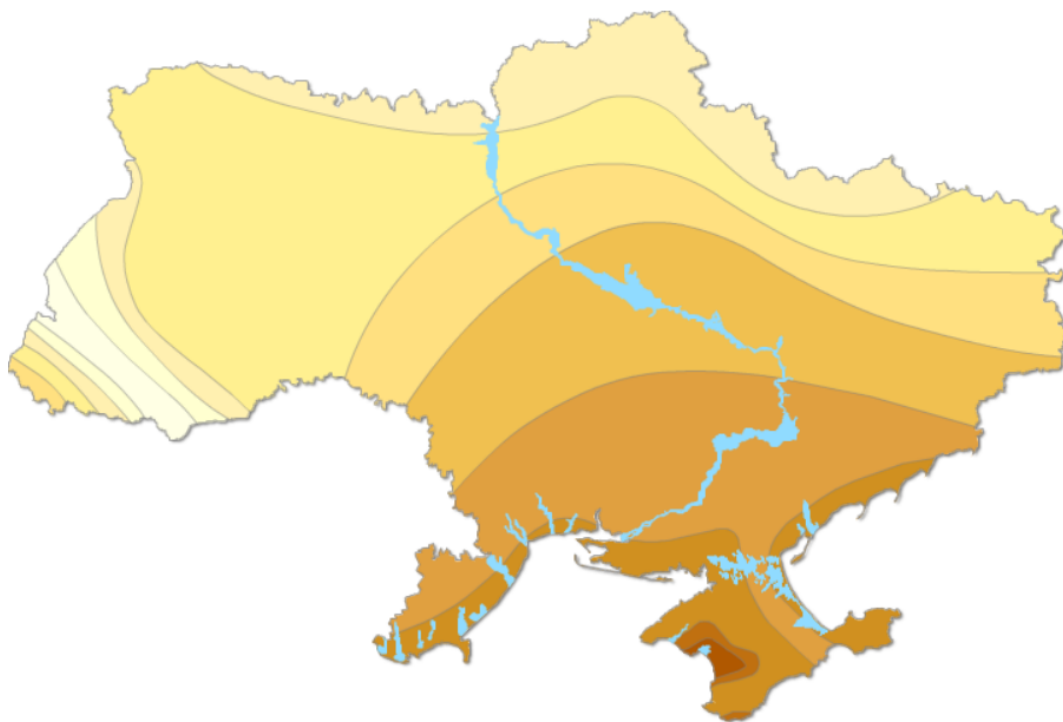


Рис. 1.1 – Просторовий розподіл сумарної сонячної радіації в Україні

Спектральний склад і кут падіння світла впливають на фотострум через коефіцієнт поглинання кремнію та оптичні втрати покриттів. При відхиленні від нормалі на 45° оптичні втрати на лицьовій поверхні можуть перевищувати 5–8 % навіть з антивідбивним шаром, а додаткові втрати на «несприятливому» спектрі ранком і надвечір легко додають ще 3–6 %. Для портативних панелей корисні мікротекстури і багатошарові покриття, що знижують відбиття у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах, а також механізми швидкого наведення на Сонце з кроком $10\text{--}15^\circ$.

Основні рівняння та температурні залежності

Теплова напруга визначенням:

$$VT = k \cdot T / q$$

Однадіодна модель осередку з R_s та R_{sh} (лінійний запис без дробових конструкцій):

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot (\exp((V + I \cdot R_s) / (n \cdot VT)) - 1) - (V + I \cdot R_s) / R_{sh}$$

Коефіцієнт заповнення, максимальна потужність та ККД

$$FF = (V_{mpp} \cdot I_{mpp}) / (V_{oc} \cdot I_{sc})$$

$$P_{max} = V_{mpp} \cdot I_{mpp}$$

$$\eta = P_{max} / (G \cdot A)$$

Показовий числовий приклад (36 осередків)

STC: $I_{sc} = 5,5 \text{ A}$; $V_{oc} = 22,0 \text{ V}$; $I_{mpp} = 5,0 \text{ A}$; $V_{mpp} = 18,0 \text{ V} \rightarrow P_{max} = 90 \text{ W}$; $FF \approx 0,744$.

Температурні коефіцієнти: $\alpha I_{sc} = +0,05 \text{ \%/}^\circ\text{C}$; $\beta V_{oc} = -0,30 \text{ \%/}^\circ\text{C}$. Для $G = 600 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ і $T_{cell} = 45^\circ\text{C}$:

$$I_{sc}(45^\circ\text{C}, 600) \approx 5,5 \cdot 0,6 \cdot (1 + 0,0005 \cdot 20) = 3,33 \text{ A}$$

$$V_{oc}(45^\circ\text{C}) \approx 22,0 \cdot (1 - 0,003 \cdot 20) = 19,68 \text{ V}$$

$$P_{max} \approx 0,72 \cdot 19,68 \cdot 3,33 \approx 47,2 \text{ W}$$

$$\eta_{STC} = 90 / (0,5 \cdot 1000) = 0,18 = 18 \%$$

Оцінка температури осередку через NOCT

$$T_{cell} \approx T_{amb} + (NOCT - 20^\circ\text{C}) \cdot (G / 800)$$

Комбінування модулів та MPPT

$$V_{mpp,tot} \approx N_s \cdot V_{mpp}, \quad I_{mpp,tot} \approx N_p \cdot I_{mpp}$$

Вплив R_s та R_{sh}

$$I(V \approx 0) \rightarrow I_{sc}, \quad I(V \approx V_{oc}) \approx -V / R_{sh}$$

Умова максимальної потужності

$$d(V \cdot I)/dV = 0$$

Коефіцієнт заповнення є чутливим індикатором втрат у провідниках і з'єднувачах. Для монокремнієвих осередків класу PERC у чистих лабораторних умовах він становить 0,74–0,80. Додаткові 50–100 мОм послідовного опору на дорозі від модуля до перетворювача зменшують площу під кривою настільки, що добова енергія скорочується на 3–7 % при звичних струмах 4–8 А. Тому у портативних виробах критично правильно обрати переріз кабелю, мінімізувати довжину та кількість конекторів, а також застосовувати якісні обтиски з перевіреним перехідним опором.

Часткове тінювання різко деформує ВА-криву. Одна затінена секція з 18 осередків у модулі на 36 осередків здатна зрушити робочу напругу в точці максимальної потужності на 25–40 %, створити кілька локальних максимумів і спричинити помилки відслідковування у простих алгоритмів. Саме для цього встановлюють байпасні діоди, які «вирізають» затінені секції та запобігають гарячим точкам. У портативних системах, де тінь від руки, гілки або антени з'являється раптово, доцільно використовувати контролери з інкрементальною провідністю або вдосконаленими варіантами збудження і спостереження, які вміють виходити з локальних максимумів за 0,2–1,0 с.

Матеріал і структура осередків задають фізичні межі ефективності. Типові значення для портативних модулів із монокремнію сьогодні 19–22 % на рівні модуля. Полікремнієві рішення дають 17–19 %. Тонкоплівкові технології мають нижчу питому потужність на площу, але кращу поведінку за розсіяного освітлення. Вибір визначається не лише паспортною ефективністю,

а й питомою енергією на кілограм, термостабільністю, поведінкою при тінюванні та сумісністю з механікою складаних корпусів.

Деградаційні механізми впливають на форму кривої поступово. Світлова індукована деградація у класичних р-тип кремнієвих осередках протягом перших 100–200 годин експозиції може тимчасово знизити номінальну потужність на 1–3 %. Після цього на горизонті 1–3 років у портативних виробках частіше проявляються не стільки фотоіндуковані ефекти, скільки контактні та механічні дефекти: мікротріщини ламелей, розклейка інкапсулянта, підвищений контактний опір у місцях складання. Це ще один аргумент на користь конструкторських рішень з демпфуванням вібрацій і ретельним тепловим розведенням.

Насамкінець варто зафіксувати робочі числові орієнтири для портативної СЕС потужності 60–120 Вт. Ефективна площа модуля 0,35–0,70 м². Робочі струми 3–7 А при напрузі у точці максимальної потужності 14–24 В залежно від кількості осередків у послідові та типу контролера. Бажаний коефіцієнт заповнення у зібраному виробі не нижче 0,70. Допустимий перехідний опір на кабель і конектори до 50 мОм на сторону.

1.2. Архітектури й компоненти портативних систем: фотомодулі, MPPT-контролери, акумуляторні батареї, інвертори, системи BMS

Архітектура портативної системи це послідовний ланцюг перетворень від фотонів до корисної роботи навантаження. Сукупний корисний вихід задається добутком ККД кожної ланки.

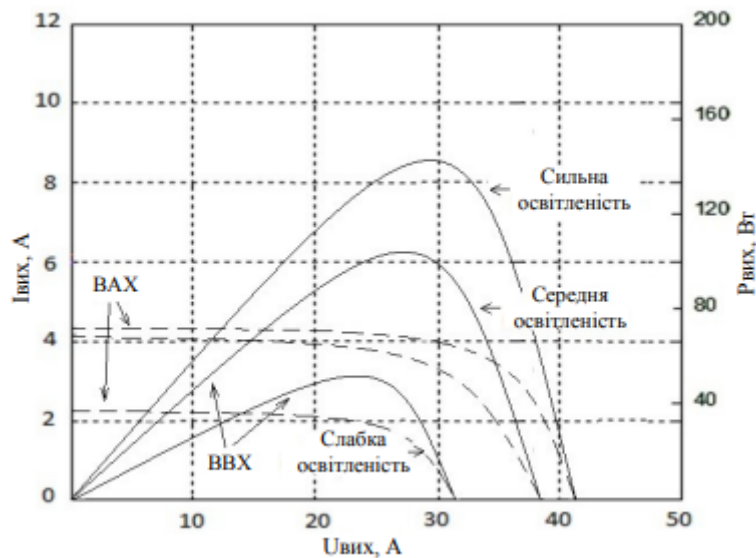


Рис.1.2 - Методичні матеріали ВНТУ з готовим графіком VAX/BBX

Тому цінні не лише паспортні показники компонентів, а їхній внесок у питомі метрики комплекту: ват на кілограм, ват годин на кілограм, ват годин на літр, а також енергія за день на кілограм при заданій інсоляції. Практичний орієнтир для класу 60–120 ват: модуль із корисною площею 0,35–0,70 м² забезпечує в ясний день 0,35–0,50 кіловат години на клемах MPPT за умови правильного узгодження напруги і мінімальних втрат у проводці, а сумарна маса комплекту тримається в межах 8–11 кілограмів із автономною роботою 6–10 годин для навантаження 30–50 ват.

$$\eta_{\text{заг}} = \eta_{\text{модуль}} \cdot \eta_{\text{MPPT}} \cdot \eta_{\text{проводка}} \cdot (\eta_{\text{DC}} \text{ або } \eta_{\text{інвертор}}) \cdot \eta_{\text{BMS}}$$

Корисна денна енергія:

$$E_{\text{out}} = G_{\text{доб}} \cdot A \cdot \eta_{\text{модуль}} \cdot \eta_{\text{MPPT}} \cdot \eta_{\text{проводка}} \cdot \eta_{\text{інвертор}}$$

Фотомодуль і температура осередків

Фотомодуль задає верхню межу потужності. Робоча точка: V_{mpp} , I_{mpp} ; максимальна потужність і ефективність:

$$P_{\text{max}} = V_{\text{mpp}} \cdot I_{\text{mpp}}$$

$$\eta_{\text{модуль}} = P_{\text{max}} / (G \cdot A)$$

Оцінка температури осередків за NOCT:

$$T_{cell} \approx T_{amb} + (NOCT - 20\text{ }^{\circ}\text{C}) \cdot (G / 800)$$

Числовий приклад (NOCT = 45 °C, T_{amb} = 30 °C, G = 800 Вт·м⁻²):

$$T_{cell} \approx 30 + (45 - 20) \cdot 1 = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Лінійна температурна модель для кремнію з $\beta V_{oc} \approx -0,30\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$V_{oc}(55\text{ }^{\circ}\text{C}) \approx 22,0 \cdot (1 - 0,003 \cdot 30) = 20,02\text{ V}$$

За F = 0,72 та I_{sc} = 3,5 A:

$$P_{max} \approx 0,72 \cdot 20,02 \cdot 3,5 \approx 50,4\text{ W}$$

Узгодження з MPPT та перевірка вікон напруги

Вибір кількості осередків N_s у послідові так, щоб робоче вікно контролера включало V_{mpp} у холоді/спеці.

$$V_{mpp,tot} \approx N_s \cdot V_{mpp}$$

Приклад: вхідне вікно MPPT = 12...60 V, модуль на 36 осередків: V_{mpp} ≈ 18 V (STC) → 16 V (спека). Для 2 модулів: V_{mpp,tot} ≈ 32...36 V умова виконується.

Перевірка безпеки за максимальною напругою (V_{oc} в холоді, -10 °C):

$$\begin{aligned} V_{oc}(-10\text{ }^{\circ}\text{C}) &\approx 22,0 \cdot [1 - 0,003 \cdot (-10 - 25)] = 22,0 \cdot (1 + 0,105) \\ &= 24,31\text{ V} \end{aligned}$$

Для 2 модулів послідовно: 2 · 24,31 = 48,6 V < 60 V у межах більшості портативних MPPT.

Від вибору архітектури залежить розподіл втрат між ланками. У варіанті прямого живлення постійним струмом без інвертора вдається уникнути 8–12 відсотків додаткових втрат, натомість потрібно забезпечити кілька стабілізованих ліній напруги, зокрема 5 вольт, 12 вольт і за потреби 20 вольт для швидкої зарядки.

Узгодження фотомодуля з MPPT визначається не лише піковою потужністю, а й положенням робочої напруги в діапазоні контролера у холодних і гарячих станах. Практично цільовий V_{mpp} модуля для шини 12,8 вольт має бути 16–19 вольт для одиночного модуля або 32–36 вольт для двох

послідовно, щоб забезпечити запас від нижньої межі вікна MPPT щонайменше 10–15 відсотків при тінюванні.

Для акумуляторного блока ключовими є глибина розряду та струм заряджання від модуля через MPPT. Для ємності 20–30 ампер годин доцільно обмежувати сталий струм 0,3–0,5 С, підтримуючи температурні межі заряджання 0–45 градусів Цельсія і розряду мінус 20–60 градусів Цельсія. Точність вимірювання напруги елементів не гірша за 5 мілівольт необхідна для коректного балансування.

На рівні силової частини критичною є комутація і проводка. При робочому струмі 6 ампер падіння на лінії довжиною 3 метри та перерізі 2,5 міліметра квадратного становить близько 0,25 вольт, тобто приблизно 1,5 відсотка від напруги в точці максимальної потужності. Це відразу зменшує запас коефіцієнта заповнення. Додатково потрібно контролювати перехідний опір конекторів не вище 10 міліомів на контакт.

Ефективність MPPT як функція навантаження

Ефективність контролера як функція частки навантаження $x = P_{in} / P_{nom}$ можна апроксимувати:

$$\eta_{MPPT}(x) \approx \eta_{max} - \Delta_{пер}(x)$$

Для якісних пристроїв $\eta_{max} \approx 0,97$; на $x = 0,1$ падіння $\Delta_{пер} \approx 0,02 \dots 0,03$. Практичне правило: у типових умовах забезпечити $x > 0,2$ не менше ніж 70 % часу генерації.

Акумулятор: ємність, струм заряду, час

Ємність у ампер-годинах, з урахуванням допустимої глибини розряду (DOD) і ККД ланцюга:

$$CAh = E_{доб} / (V_{системи} \cdot DOD \cdot \eta_{ланцюга})$$

Приклад: $E_{доб} = 240 \text{ Вт} \cdot \text{год}$, $V_{системи} = 12,8 \text{ V}$ (LiFePO₄, 4S), DOD = 0,8, $\eta_{ланцюга} = 0,95$:

$$CAh \approx 240 / (12,8 \cdot 0,8 \cdot 0,95) \approx 24,6 Ah$$

→ обрати 25 ... 30 Ah з запасом.

Струм заряду (рекомендована межа довговічності):

$$I_{charge,max} = 0,5 \cdot CAh$$

Час заряджання від 20 % до 100 % для алгоритму CC + CV:

$$t_{CC} \approx 0,6 \cdot CAh / I$$

$$t_{CV} \approx 0,4 \cdot CAh / I$$

Для $CAh = 25 \text{ Ah}$ та $I = 12,5 \text{ A}$: $t_{CC} \approx 1,2 \text{ год}$; $t_{CV} \approx 0,8 \text{ год}$; сумарно $\approx 2,0 \text{ год}$ (реально 2,5...3,0 год у полі).

Ресурс vs DOD (LiFePO_4)

Емпірична залежність:

$$N \approx N_{\text{реф}} \cdot (DOD_{\text{реф}} / DOD)^k, \quad 0,3 \leq k \leq 0,6$$

За $N_{\text{реф}} = 3000$ циклів при 80 %: для 50 % очікувано 3800...4200 циклів.

BMS: пороги та тепловий режим

Пороги для LiFePO_4 (на елемент): $U_{hi} = 3,65 \text{ V}$; $U_{lo} = 2,8 \text{ V}$; заряд 0...45 °C; розряд -20...60 °C. Для збірки 4S: 11,2...14,6 V. Точність вимірювання для балансування $\leq 5 \text{ мВ}$; спрацьовування КЗ на 5...10 C за $\leq 10 \text{ мс}$.

Підвищення температури:

$$\Delta T \approx P_{\text{втрати}} \cdot R_{th}$$

При $P_{\text{втрати}} = 4 \text{ W}$ та $R_{th} = 5 \text{ K/W}$: $\Delta T \approx 20 \text{ °C} \rightarrow$ потрібна вентиляція/теплопровідні вставки.

Інвертор: ККД і холостий хід

Портативний клас 150...300 W: $\eta_{\text{max}} 92...94 \%$ у діапазоні 50...80 % номіналу; на 20 % 88...92 %; на 5...10 % 80...85 %. Струм холостого ходу $I_{idle} \leq 0,3 \text{ A}$ для 12 V $\rightarrow P_{idle} \leq 3,6 \text{ W}$.

Добові втрати при безперервній роботі:

$$E = P \cdot 24$$

За 3,6 W: $E_{idle} = 86,4 \text{ Вт} \cdot \text{год} \rightarrow$ до 20...30 % денного бюджету малої системи. Рекомендація: інвертор вмикати лише за потреби; для постійних споживачів використовувати DC/DC.

Проводка та з'єднувачі: падіння напруги і втрати

Падіння напруги на лінії:

$$\Delta V = I \cdot R_{\text{лінії}}, \quad R_{\text{лінії}} = \rho \cdot (2L) / S$$

Для міді $\rho \approx 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$. При $I = 6 \text{ А}$, $L = 3 \text{ м}$, $S = 2,5 \text{ мм}^2$:

$$R_{\text{лінії}} \approx 0,0175 \cdot 6 / 2,5 \approx 0,042 \text{ }\Omega$$

$$\Delta V \approx 6 \cdot 0,042 \approx 0,25 \text{ V} \quad (\approx 1,6 \% \text{ від } 16 \text{ V})$$

$$P = I^2 \cdot R_{\text{лінії}} = 6^2 \cdot 0,042 \approx 1,5 \text{ W}$$

Перехідний опір з'єднувача $10 \text{ м}\Omega$ на контакт (два контакти): додатково $\approx 0,72 \text{ W}$. Вимога: сумарний опір кола $\leq 50 \text{ м}\Omega$ на сторону.

Часткове тінювання і байпасні секції

Модуль 36 осередків з двома діодами (по 18). Затінення однієї секції відкриває діод, V_{mpp} падає $\approx$ удвічі. Якщо $V_{\text{mpp}} = 18 \text{ V}$ без тіні, з тінню очікується $9 \dots 11 \text{ V}$. Контролер має вміти знаходити новий максимум та мати запас нижньої межі вікна $\geq 10 \dots 15 \%$.

Підсумковий розрахунок для комплекта 100 W

Вихідні: 36 осередків; $V_{\text{mpp}} = 18 \text{ V}$; $I_{\text{mpp}} = 5,6 \text{ А}$; $A = 0,55 \text{ м}^2$; $\eta_{\text{модуль}}(\text{STC}) = 18 \%$. MPPT: $\eta_{\text{MPPT}} = 96 \%$. Проводка: втрати 2% . Денна інсоляція $G_{\text{доб}} = 5 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$; підвищена температура $\rightarrow$ ефективна $\eta_{\text{модуль}} = 16 \%$.

Денна генерація на клемах MPPT:

$$EDC \approx 5000 \cdot 0,55 \cdot 0,16 \cdot 0,96 \cdot 0,98 = 412 \text{ Вт} \cdot \text{год}$$

Споживання: інвертор 120 W протягом 2 год при $\eta_{\text{інвертор}} = 92 \%$; DC-навантаження 20 W протягом 8 год при $\eta_{\text{DC}} = 95 \%$.

$$EAC = 120 \cdot 2 / 0,92 = 261 \text{ Вт} \cdot \text{год}$$

$$EDC = 20 \cdot 8 / 0,95 = 168 \text{ Вт} \cdot \text{год}$$

Разом потреба: $429 \text{ Вт} \cdot \text{год}$. Баланс: дефіцит $\approx 17 \text{ Вт} \cdot \text{год}$. Варіанти компенсації: $A \rightarrow 0,60 \text{ м}^2$ ($\approx 37 \text{ Вт} \cdot \text{год}$); зменшити падіння проводки до 1% ($\approx 4 \text{ Вт} \cdot \text{год}$); підвищити η_{MPPT} до 97% ($\approx 4 \text{ Вт} \cdot \text{год}$). Сукупно: $\approx 8 \text{ Вт} \cdot \text{год}$.

Усі ці рішення мають бути узгоджені з тепловим режимом у компактному корпусі. При тепловому опорі близько 5 кельвін на ват навіть 4 ват втрат дають підвищення температури на $20 \text{ градусів Цельсія}$, тому потрібні вентиляційні прорізи та теплопровідні вставки.

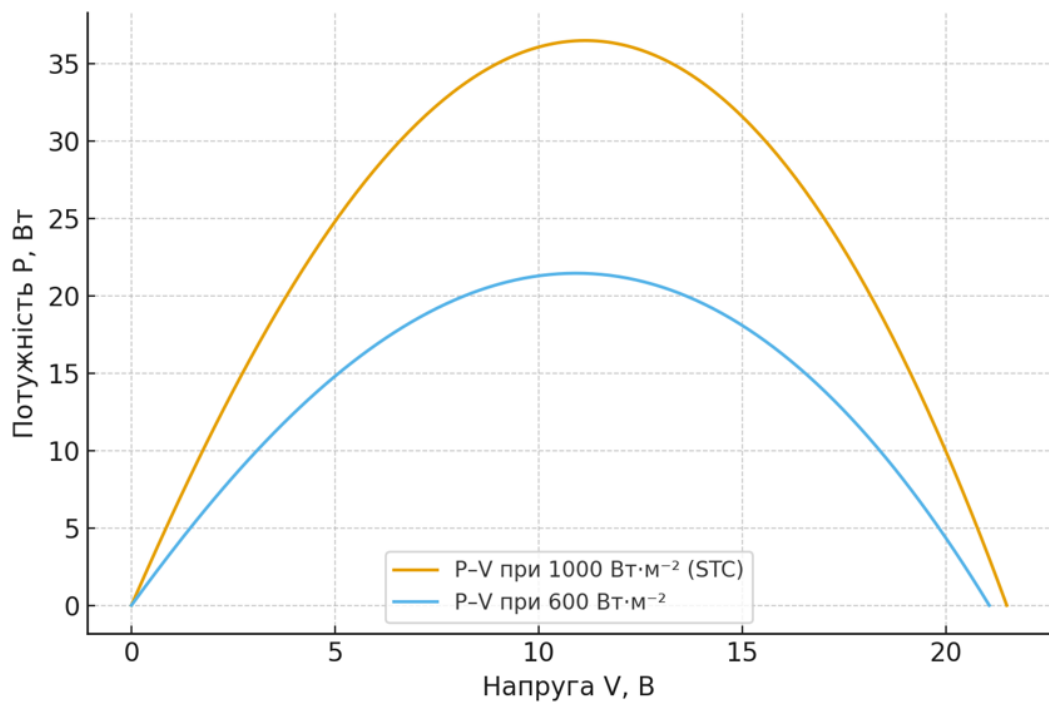


Рис.1.3 - Залежність максимальної потужності $P_{\max}$ від температури осередків

Системно порівняємо варіанти конфігурацій фотомодулів, розглянемо діапазони та ККД реальних МРРТ у часткових навантаженнях, підберемо ємність і хімію акумуляторів з урахуванням ресурсу за різних глибин розряду, оцінимо потребу в інверторі з погляду добового бюджету енергії, а також сформулюємо мінімальні вимоги до BMS, комутації і захисту, які гарантують безпечну експлуатацію портативної СЕС у полі.

1.3. Нормативи і безпека: стандарти ІЕС, випробування UN38.3, ступені ІР-захисту, електромагнітна сумісність; огляд сучасних рішень

Нормативна база портативних сонячних систем спирається на три опорні блоки. Перший блок це стандарти на фотомодулі і компоненти постійного струму. Другий блок це безпека батарей і вимоги до транспортування осередків і збірок. Третій блок це електромагнітна сумісність

і стійкість електроніки керування. Для модулів застосовують серію IEC 61215 як кваліфікаційні випробування на довговічність і серію IEC 61730 як вимоги електробезпеки. Типовими для портативних моно і полікремнієвих модулів є IEC 61215-1 та IEC 61215-2, де перевіряють термоциклування, вологе тепло, механічні навантаження, градобій, деградацію від ультрафіолету, потенційно індуковану деградацію. За IEC 61730 перевіряють основну і додаткову ізоляцію, опір витоку, трекінг, відстані повзучості і міжповерхневі зазори, а також стійкість до займання. Для силової електроніки постійного струму і інверторів застосовують IEC 62109 як функціональну безпеку силових перетворювачів для фотоелектричних систем, а для портативного рівня напруг найчастіше орієнтуються на SELV тобто безпечну наднизьку напругу нижче 60 вольт постійного струму при виконанні вимог до ізоляції і відстаней.

Ключові механічні та кліматичні випробування за IEC 61215 моделюють багаторічну експлуатацію. Термоцикли проводять у діапазоні мінус 40 градусів Цельсія до плюс 85 градусів Цельсія з числом циклів 200 або 600 залежно від програми, допустиме зниження вихідної потужності після повного циклу зазвичай не більше 5 відсотків від номінальної. Режим вологого тепла проводять при температурі 85 градусів Цельсія та відносній вологості 85 відсотків протягом 1 000 годин, після чого перевіряють відсутність корозії струмопровідних шин і збереження електробезпеки. Механічне навантаження імітує вітер і сніг із тиском до 2 400 паскалів для фронтального навантаження і до 5 400 паскалів для тиску на стиснення, для портативних модулів часто встановлюють менші пороги через тонші підкладки, однак зобов'язуються витримувати локальні удари і вигин під час складання і перенесення. У тесті градобоя використовують полімерні або крижані сфери діаметром 25 міліметрів зі швидкістю близько 23 метрів за секунду, після серії ударів перевіряють цілісність скла або ламінату і збереження електричних параметрів.

Електробезпека відповідно до IEC 61730 визначає межі для основної і додаткової ізоляції, перевіряє витримування напруги і струм витоку. Для

портативного класу із SELV напруга між первинними і вторинними колами має витримувати підвищену випробувальну напругу на рівні 1 000–2 500 вольт залежно від категорії ізоляції і матеріалу, а вимірний струм витoku при номінальних умовах не повинен перевищувати кількох мікроампер для модулів і кількох міліампер для перетворювачів змінного струму з фільтрами ЄМС. Відстані повзучості та електричні зазори прив'язують до робочої напруги, забрудненості середовища та групи матеріалу. Для напруг до 60 вольт постійного струму мінімальні зазори у сухому середовищі часто становлять 1,0–1,5 міліметра, а повзучість для полімерів групи матеріалу 3 становить 1,6–2,5 міліметра. У практичному конструюванні портативних систем закладають резерв не менше 30 відсотків до мінімальних нормативних значень, щоб компенсувати вплив пилу і вологи.

Класи захисту оболонки від пилу і води задаються за ІЕС 60529. Для польової експлуатації портативних СЕС типовими є IP54 для базових корпусів, IP65 для бризко і пилозахисних виконань і IP67 для короткочасного занурення у воду. IP54 означає захист від пилу у кількості, що не порушує роботу, і захист від бризок з будь-якого напрямку. IP65 означає повний пилозахист і захист від струменів води з тиском до 30 кілопаскалів з усіх напрямів. IP67 означає повний пилозахист та витримування занурення на глибину до 1 метра протягом 30 хвилин. Для портативної електроніки з вентиляційними отворами і роз'ємами реальна герметизація часто локалізується на критичних відсіках із силовими елементами і батареєю, а зовнішні інтерфейси закривають ущільненими кришками. Важливо враховувати, що підвищення класу IP збільшує тепловий опір корпусу і потребує детального теплового розрахунку, інакше електроніка працюватиме при температурах плюс 70 плюс 90 градусів Цельсія, що пришвидшує деградацію конденсаторів і силових ключів.

Вимоги до безпеки акумуляторних батарей включають як експлуатаційну, так і транспортну складові. Для літій іонних систем у портативних станціях застосовують випробування UN38.3, що є

обов'язковими для повітряних та більшості видів міжнародних перевезень. Програма включає 8 тестів. Тест 1 це імітація висоти з пониженим тиском близько 11,6 кПа протягом 6 годин. Тест 2 це тепловий цикл від мінус 40 до плюс 75 градусів Цельсія з 10 циклами і витримками по 6 годин на кожному плато. Тест 3 це вібрація у діапазоні 7–200 герц з амплітудою 1 г з тривалістю 3 години на кожній осі. Тест 4 це удар із піковим прискоренням 150 г і тривалістю імпульсу 6 мілісекунд, 3 імпульси на вісь у кожному напрямі. Тест 5 це коротке замикання при температурі 55 градусів Цельсія з внутрішнім опором кола менше 80 міліомів. Тест 6 це удар або пробій гострим предметом для елементів за спеціальними процедурами. Тест 7 це перезаряд до 2 разів від номінальної напруги або до заданого струму з контролем температури і тиску. Тест 8 це розряд зі струмом, що перевищує номінальний, або блокування вентиляції з імітацією відмов активного захисту. Після кожного етапу фіксують відсутність витоків, займання і вибуху, а також стабільність напруги. Для відвантаження батареї повинні знаходитись у стані заряду не більше 30 відсотків, марковані як вантаж класу 9 з відповідною декларацією і ідентифікаційними номерами, а партія має супроводжуватися протоколом тестів.

Система керування батареєю є частиною функціональної безпеки. Аналітичною основою є моніторинг напруги кожного елемента, струмів і температур, а також ліміти для відсікання. Для літій залізо фосфат робочий діапазон одного елемента 2,5–3,65 вольт, робочі температури заряд 0–45 градусів Цельсія та розряд мінус 20–60 градусів Цельсія. Захист від короткого замикання повинен спрацьовувати за 1–10 мілісекунд при струмі 5–10 С, а захист від перенапруги на елемент має затримку не більше 50 мілісекунд для недопущення розгону напруги під час переходу на стадію постійної напруги. Для портативних блоків з 4 елементів послідовно контроль відхилення між елементами не повинен перевищувати 20–30 мілівольт у верхній зоні напруги, інакше балансування не встигає, що веде до передчасного відсікання заряду і втрати доступної ємності. На рівні комутації батарей доцільно застосовувати

запобіжники постійного струму з характеристикою швидкого відсікання при струмі 2–3 С, а також твердотільні реле або MOSFET з низьким опором каналу нижче 10 міліомів у кожному плечі для мінімізації тепловиділення.

Електромагнітна сумісність для портативних СЕС охоплює як емісію, так і імунітет. Для побутового використання орієнтуються на межі класу В за CISPR для радіочастотних випромінювань і наведень у мережу змінного струму, а також на загальні стандарти імунітету IEC 61000 4 серії. Силові перетворювачі з високочастотними ключами навантажують спектр у діапазоні десятків і сотень кілогерц, що потребує вхідних LC фільтрів, екранів і правильного компонування петлі струму. Для портативного формфактора ключовою є мінімізація площ високострумів контурів до кількох квадратних сантиметрів і використання конденсаторів з низьким еквівалентним опором і індуктивністю. Імунітет до електростатичних розрядів зазвичай перевіряють при рівнях до 8 кіловольт контактний та до 15 кіловольт повітряний, імунітет до електромагнітних полів перевіряють у діапазоні 80 мегагерц до 1 гігагерц при напруженості 3–10 вольт на метр залежно від класу. Внутрішня побутова експлуатація вимагає виконання класу В для випромінювань, у польових умовах критичним є також імунітет до імпульсних перенапруг від грози при довгих провідниках постійного струму, тому додають обмежувачі напруги і газорозрядники на вході МРРТ.

Ступінь електричної безпеки у портативному класі досягається поєднанням нормативних вимог і простих інженерних правил. Перш за все це межа напруги SELV нижче 60 вольт постійного струму на клеммах користувача, подвійна ізоляція між мережевою частиною інвертора і низьковольтною шиною, автомат постійного струму або запобіжник на стороні батареї з правильним номіналом за умовами короткого замикання, індикатори станів і маркування клем. Усі силові з'єднання мають бути розбірними лише за умови повного знеструмлення. Контактні пари повинні мати механічний захист від переполювання полярності, а корпуси з металу з'єднуються з загальною точкою заземлення інвертора, якщо передбачено роботу зі змінною напругою.

Для виходів постійного струму застосовують гнізда з захистом від дотику. Кришки батарейного відсіку повинні мати індикатори попередження про наявність високого струму короткого замикання та заборону роботи при пошкодженій ізоляції.

Сучасні інтегровані рішення для портативних електростанцій поєднують фотомодуль, MPPT, батарею і інвертор в одному корпусі з комунікаційними інтерфейсами. Типовими є використання вискоефективних DC DC на базі синхронних перетворювачів із піковим ККД 95–97 відсотків, підтримка USB Power Delivery з профілями 5 вольт 9 вольт 12 вольт 15 вольт 20 вольт до 5 ампер, а у версіях з підтримкою розширених профілів 28 вольт 36 вольт 48 вольт до 5 ампер з максимальною потужністю до 240 ват. У інверторній частині поширюються силові модулі на карбіді кремнію та нітриді галію для зниження втрат при малих габаритах радіаторів. У BMS використовують точні вимірювальні мости з дискретністю 1 мілівольт і струмовими шунтами 50–100 міліомів з температурною компенсацією. Корпуси переходять на IP65 і вище з роз'ємами з фіксаторами та гумовими ущільненнями. На рівні системних функцій додають реєстрацію циклів, облік енергії, прогноз часу роботи за поточним навантаженням і швидкі алгоритми відновлення після глибокого розряду з коректним протоколом передзаряду малим струмом до підняття напруги елементів.

Набір нормативів і випробувань створює рамку, в якій портативна СЕС повинна одночасно бути електробезпечною, механічно і кліматично стійкою та електромагнітно сумісною. Практична інтеграція цих вимог для класу до 60 вольт постійного струму означає виконання IEC 61215 і IEC 61730 для модулів, IEC 62109 для силових перетворювачів, IEC 60529 для оболонок, UN38.3 для транспорту батарей, а також відповідності побутовому класу ЄМС. Виконання цих вимог у проєкті з правильно розрахованими відстанями, ізоляцією, тепловим режимом і фільтрами дозволяє отримати передбачувану надійність і стабільну енерговіддачу при мінімальній масі та габаритах, що є критично важливим для портативної архітектури.

РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНКИ ПОРТАТИВНОЇ СТАНЦІЇ

2.1. Вимоги технічного завдання, сценарії використання та енергобаланс

Портативна сонячна станція проєктується не як зменшена копія стаціонарної установки, а як цілісний енергетичний виріб з жорсткими обмеженнями на масу, габарити, швидкість розгортання, екологічні умови експлуатації та безпеку користувача. На етапі формування технічного завдання принципово важливо не лише зібрати побажання щодо напруг, роз'ємів і запасу потужності, а й фіксувати типові профілі споживання енергії протягом доби, допускаємі пікові навантаження, тривалість автономної роботи без сонця, гранично допустиме підвищення температури компонентів у замкненому корпусі, рівні шуму для вентиляторів і допустиме падіння напруги на лініях постійного струму. Усе це перетворюється на числові вимоги для модулів і перетворювачів та на перевіряємі критерії приймання.

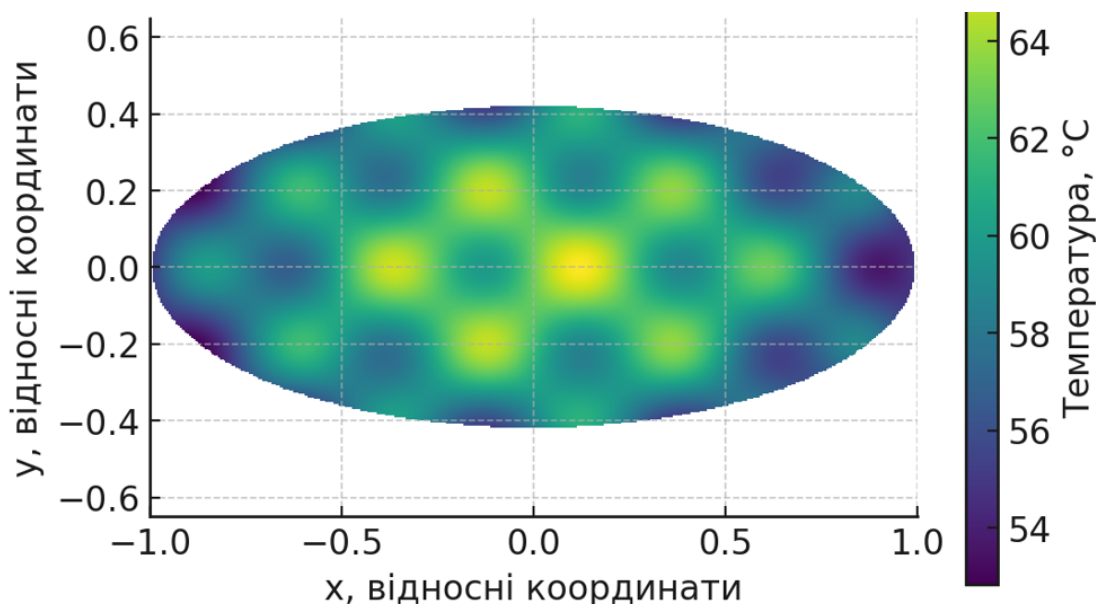


Рис.2.1 - Теплова карта PV-модуля в корпусі

Перш ніж підбирати елементну базу, слід задати реалістичні кліматичні і користувацькі припущення. Для України доцільно приймати характерні добові значення інсоляції для сезонів і широт, щоб уникнути завищення очікувань. Далі визначається набір цільових сценаріїв, наприклад легкий польовий зв'язок з тривалим навантаженням постійного струму малої потужності, аварійне живлення з короткими імпульсними піками через інвертор на середній потужності, лабораторний режим з максимальною генерацією в полудень з метою швидкого підзаряду акумулятора. Для кожного сценарію описуються часові вікна роботи навантажень, чутливість до просідання напруги, частка споживання на постійному струмі та на змінному струмі, а також пріоритети вимкнення у разі дефіциту енергії.

Вимоги технічного завдання задають межі для всіх подальших рішень. Портативна станція повинна забезпечувати роботу змішаних навантажень постійного та змінного струму, мати масу не більше 11 кг, габарити не більше 450×300×200 мм, клас захисту оболонки не нижче IP54, можливість швидкого розгортання за 2 хв і роботу при температурі довкілля від −20 °C до +45 °C. Енергетична шина постійного струму 12,8 В на базі LiFePO₄, інвертор 230 В для епізодичних навантажень, MPPT-контролер з вікном вхідної напруги 12...60 В і піковим ККД не нижче 0,96. На стороні постійного струму потрібні виходи 5 В, 12 В та, за потреби, 20 В (Power Delivery).

Узагальнена енергетична модель

Сукупний корисний вихід визначається добутком ККД окремих ланок:
 $\eta_{\text{заг}} = \eta_{\text{модуль}} \cdot \eta_{\text{MPPT}} \cdot \eta_{\text{проводка}} \cdot \eta_{\text{інвертор (або DC)}} \cdot \eta_{\text{BMS}}$

Корисна денна енергія на виході:

$$E_{\text{out}} = G_{\text{доб}} \cdot A \cdot \eta_{\text{модуль}} \cdot \eta_{\text{MPPT}} \cdot \eta_{\text{проводка}} \cdot \eta_{\text{інвертор}}$$

Базовий добовий енергобаланс навантажень

Базовий польовий сценарій: DC 20 Вт × 8 год, інвертор 120 Вт × 2 год, та заряджання 30 Вт × 2 год (через DC).

$$E_{\text{AC}} = 120 \cdot 2 / \eta_{\text{інвертор}} = 261 \text{ Вт} \cdot \text{год (за } \eta_{\text{інвертор}} = 0,92)$$

$$E_{\text{DC}} = 20 \cdot 8 / \eta_{\text{DC}} + 30 \cdot 2 / \eta_{\text{DC}} = 231 \text{ Вт} \cdot \text{год (за } \eta_{\text{DC}} = 0,95)$$

$$E = EAC + EDC = 492 \text{ Вт} \cdot \text{год}$$

Генерація від фотомодуля та дефіцит

На основі сценаріїв будується енергетичний баланс доби. Методично правильним є обчислювати енергію на виході модуля через інтегральну інсоляцію, ефективну площу та множники ККД, а споживання складати окремо для плеча постійного струму і для плеча змінного струму з урахуванням втрат інвертора у робочій зоні і на холостому ході. Теплові поправки вводяться через оцінку температури осередків за показником номінальної робочої температури осередку, а провідникові втрати через обчислення падіння напруги на реальній довжині кабелів і перехідних опорах роз'ємів. Отриманий числовий баланс показує потрібну площу фотомодуля для нульового дефіциту в ясний день, необхідну ємність батареї для заданої тривалості автономності та сукупний запас за напругою на вході контролера відстеження точки максимальної потужності в холодну і спекотну погоду.

Паралельно з енергобалансом формулюються вимоги першого рівня безпеки. Це межа напруги користувацьких клем у зоні безпечної наднизької напруги, граничний струм короткого замикання, пороги відсікання заряджання і розряджання на елемент, час спрацювання апаратного захисту при аварійних режимах, клас захисту оболонки від пилу і води та необхідні індикатори стану. На цій же стадії визначаються допустимі температурні підйоми для силових ключів, дроселів і акумуляторного блока та вибираються теплопровідні шляхи від гарячих зон до корпусу. Вимоги узгоджуються з тактильними обмеженнями для зовнішніх поверхонь і з акустичними обмеженнями для вентиляції.

$$EPV = G_{\text{доб}} \cdot A \cdot \eta_{\text{модуль}} \cdot \eta_{MPPT} \cdot \eta_{\text{проводка}}$$

Для $G_{\text{доб}} = 5000 \text{ Вт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$, $A = 0,55 \text{ м}^2$, $\eta_{\text{модуль}} = 0,18$, $\eta_{MPPT} = 0,96$, $\eta_{\text{проводка}} = 0,98$:

$$EPV = 5000 \cdot 0,55 \cdot 0,18 \cdot 0,96 \cdot 0,98 \approx 466 \text{ Вт} \cdot \text{год}$$

Дефіцит відносно споживання: $492 - 466 = 26 \text{ Вт} \cdot \text{год}$.

Необхідна площа модуля для нульового балансу

$$A = E / (G_{\text{доб}} \cdot \eta_{\text{модуль}} \cdot \eta_{\text{MPPT}} \cdot \eta_{\text{проводка}})$$

$$A \approx 492 / (5000 \cdot 0,18 \cdot 0,96 \cdot 0,98) \approx 0,58 \text{ м}^2 (\approx 105 \text{ Вт STC})$$

Температурний вплив через NOCT

Температура осередку (оцінка):

$$T_{\text{cell}} \approx T_{\text{amb}} + (\text{NOCT} - 20) \cdot (G / 800)$$

За NOCT = 45 °C, T_{amb} = 30 °C, G = 800 Вт/м² отримуємо T_{cell} ≈ 55 °C.

Коефіцієнт потужності від температури:

$$P = 1 + \beta_P \cdot (T_{\text{cell}} - 25)$$

$$EPV_{\text{гар}} = P \cdot EPV \approx 0,88 \cdot 466 \approx 410 \text{ Вт} \cdot \text{год} (\text{за } \beta_P = -0,4 \% / ^\circ\text{C})$$

Розмір батареї та зарядження

Ємність батареї для автономності 1 доба:

$$CAh = E_{\text{незабезпеч}} / (V_{\text{системи}} \cdot DOD \cdot \eta_{\text{ланцюга}})$$

$$CAh \approx 492 / (12,8 \cdot 0,8 \cdot 0,95) \approx 50,2 \text{ А} \cdot \text{год} \rightarrow \text{вибір } 60 \text{ А} \cdot \text{год}$$

Струм постійного струму заряду (рекомендація):

$$ICC = kC \cdot CAh \quad (kC = 0,3 \dots 0,5) \rightarrow ICC \approx 30 \text{ А (для } 60 \text{ А} \cdot \text{год)}$$

Орієнтовний робочий струм від модуля та час повного заряду:

$$I \approx PPV / V_{\text{шини}} \approx 7 \dots 9 \text{ А}$$

$$t_{\text{charge}} \approx 0,6 \cdot CAh / I_{\text{charge}} + 0,4 \cdot CAh / I_{\text{charge}} \approx 9 \text{ год}$$

Втрати у проводці

Опір лінії та падіння напруги:

$$R_{\text{лінії}} = \rho \cdot (2L) / S, \quad \Delta V = I \cdot R_{\text{лінії}}, \quad P_{\text{line}} = I^2 \cdot R_{\text{лінії}}$$

$$\rho \approx 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}; \quad I = 6 \text{ А}; \quad L = 3 \text{ м}; \quad S = 2,5 \text{ мм}^2 \rightarrow R_{\text{лінії}} \approx 0,042 \text{ Ом}$$

$$\Delta V \approx 0,25 \text{ В} (\approx 1,5 \% \text{ від } V_{\text{mpp}} \approx 16 \text{ В}), \quad P_{\text{line}} \approx 1,5 \text{ Вт}; \quad \text{контакти} \approx 0,72 \text{ Вт}$$

Перевірка безпеки за напругою холостого ходу

Напруга V_{oc} при -10 °C для панелі з V_{oc}(25 °C) = 22 В і βV_{oc} = -0,3 %/°C:

$$V_{\text{oc}}(-10 ^\circ\text{C}) \approx 22 \cdot [1 - 0,003 \cdot (-10 - 25)] = 24,31 \text{ В}$$

Для двох панелей послідовно: $48,6 \text{ В} < 60 \text{ В}$ (межа MPPT) — безпечно.

Критерії приймання

$$1) G_{\text{доб}} \cdot A \cdot \eta_{\text{модуль}} \cdot \eta_{\text{MPPT}} \cdot \eta_{\text{проводка}} \\ \geq E_{\text{load}} - E_{\text{запас}} (E_{\text{запас}} \leq 0,15 \cdot E_{\text{load}})$$

$$2) (1 + \beta_P \cdot (T_{\text{cell}} - 25)) \cdot G_{\text{доб}} \cdot A \cdot \eta_{\text{модуль}} \cdot \eta_{\text{MPPT}} \\ \cdot \eta_{\text{проводка}} \geq E_{\text{load}} - E_{\text{запас}}$$

$$3) \Delta V \leq 0,02 \cdot V_{\text{mpp}} \text{ при номінальному струмі}$$

Модуль $\approx 105 \text{ Вт STC}$ ($A \approx 0,58 \text{ м}^2$; у спеку бажано до $0,66 \text{ м}^2$), MPPT з $\text{ККД} \geq 0,96$, батарея $12,8 \text{ В } 60 \text{ А} \cdot \text{год}$ (LiFePO_4), інвертор із $\eta \approx 0,92$ у діапазоні $50\text{--}80 \%$ навантаження, проводка $2,5 \text{ мм}^2$ на 3 м (падіння $\leq 2 \%$). Для жарких або хмарних днів: або панель до 140 Вт , або скорочення інверторного режиму до 1 год .

Щоб отримати відтворювані результати, вводять приймальні критерії у вигляді нерівностей для кожного класу умов експлуатації. Наприклад для ясного дня добуток добової інсоляції, площі модуля і ККД тракту перетворення повинен бути не менше за добову потребу навантаження з урахуванням допустимого відсотка покриття акумулятором. Для спекотного дня цей вираз множиться на температурний коригуючий коефіцієнт для максимальної потужності модуля. Для проводки встановлюється обмеження падіння напруги на лінії від модуля до контролера на рівні не більше 2 відсотків у точці максимальної потужності. Для акумулятора встановлюється глибина розряду і очікуваний ресурс циклів до зниження ємності до 80 відсотків з прив'язкою до профілю реальної експлуатації.

2.2. Розрахунок і вибір фотомодулів, алгоритмів MPPT та акумуляторного блока

Розрахунок і вибір підсистем генерації та накопичення енергії виконуються як єдина оптимізаційна задача з обмеженнями на масу, габарити,

тепловий режим і енергобаланс доби. Початковими даними слугують добові профілі споживання, сезонні значення інсоляції для місця експлуатації, робочі температурні діапазони та вимоги до автономності. На цьому етапі фіксуються допуски на деградацію фотомодулів і батареї, електричні втрати у проводці й перетворювачах, а також безпекові зазори для напруг і струмів у найгірших умовах.

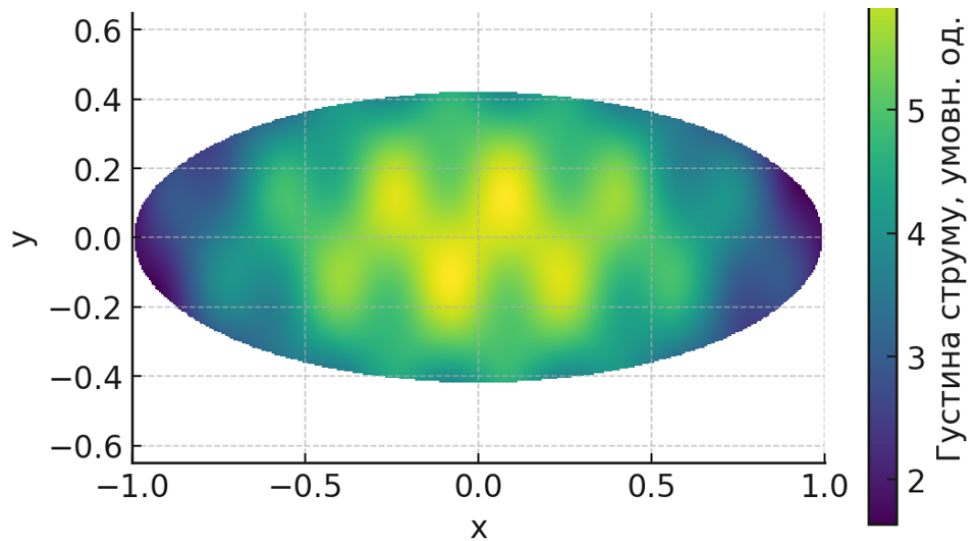


Рис.2.2. Розподіл густини струму у мідних шинах

Подальша логіка вибору така. Спершу визначається необхідна активна площа і номінальна потужність фотомодулів з урахуванням температурного зсуву точки максимальної потужності та денного коефіцієнта заповнення, характерного для портативних систем. Далі підбирається топологія з'єднання осередків, щоб робоча напруга в точці максимальної потужності стабільно потрапляла у вікно вхідних напруг контролера за холоду і спеки. Окремо оцінюється вплив часткового тінювання і кількість байпасних секцій для збереження корисної потужності в динамічних польових сценах.

Базова шина постійного струму дорівнює 12,8 В на літій-залізо-фосфат у конфігурації 4S. Денна потреба енергії $E_{load} = 492 \text{ В} \cdot \text{год}$. Для ясного дня з інтегральною інсоляцією $G_{доб} = 5\,000 \text{ В} \cdot \text{год}/\text{м}^2$ та з поправкою на реальні

ККД цільова генерація на клемі MPPT має бути близько 500 В·год. Для портативності прагнемо зберегти потужність одиночного модуля в діапазоні 100–140 В з мінімальною площею та масою.

Номінали напруги модулів прив'язуємо до вікна MPPT 12–60 В. Для шини 12,8 В потрібне V_{mp} у межах 16–19 В (один модуль) або 32–36 В (два послідовно). Типовий 36-осередковий модуль має $V_{mp} \approx 18$ В, $I_{mp} 5,5–6,0$ А, $P_{STC} 100–110$ Вт. Два послідовно дають $V_{mp} \approx 36$ В при тому ж I_{mp} і $P_{STC} \approx 200–220$ Вт, що зменшує струм на вході контролера та втрати у проводці.

Очікувану добову генерацію оцінюємо за формулою корисної енергії на клемі MPPT.

$$E_{PV} = G_{доб} \cdot A \cdot \eta_{модуль} \cdot \eta_{MPPT} \cdot \eta_{проводка}$$

Для $\eta_{модуль} = 0,18$, $A = 0,58$ м², $\eta_{MPPT} = 0,96$, $\eta_{проводка} = 0,98$ маємо $E_{PV} \approx 492$ В·год. Для двох модулів по 110 Вт активна площа $A \approx 0,64$ м² і $E_{PV} \approx 543$ В·год.

Потрібну активну площу для нульового балансу визначаємо зі співвідношення:

$$A = \frac{E_{load}}{G_{доб} \cdot \eta_{модуль} \cdot \eta_{MPPT} \cdot \eta_{проводка}}$$

Температура осередку за NOCT:

$$T_{cell} = T_{amb} + (NOCT - 20) \cdot G/800$$

Зниження максимальної потужності за температурним коефіцієнтом β_P :

$$P_{max}(T) = P_{max}(25^\circ C) \cdot (1 + \beta_P \cdot (T_{cell} - 25^\circ C))$$

Номінальна ємність батареї для автономності:

$$C_{Ah(ном)} = \frac{E_{ціль}}{V_{системи} \cdot DOD \cdot \eta_{ланцюга}}$$

Обмеження струму заряду та оцінка часу:

$$I_{CC} = k_C \cdot C_{Ah}$$

$$t_{charge} = 0,6 \cdot C_{Ah} / I_{charge} + 0,4 \cdot C_{Ah} / I_{charge}$$

Після визначення електричного «вікна» модулів підбираються алгоритми відстеження точки максимальної потужності. Критеріями є точність на нерівномірно освітлених кривих, швидкодія при змінах освітленості, власні втрати реалізації, а також поведінка на низьких рівнях навантаження, коли портативна система працює у режимі часткових навантажень. Порівнюються класичні схеми спостереження і збурення та інкрементальна провідність з їх модифікаціями, причому для портативного формфактора перевага надається алгоритмам, що забезпечують малу середню похибку при коротких вимірювальних вікнах.

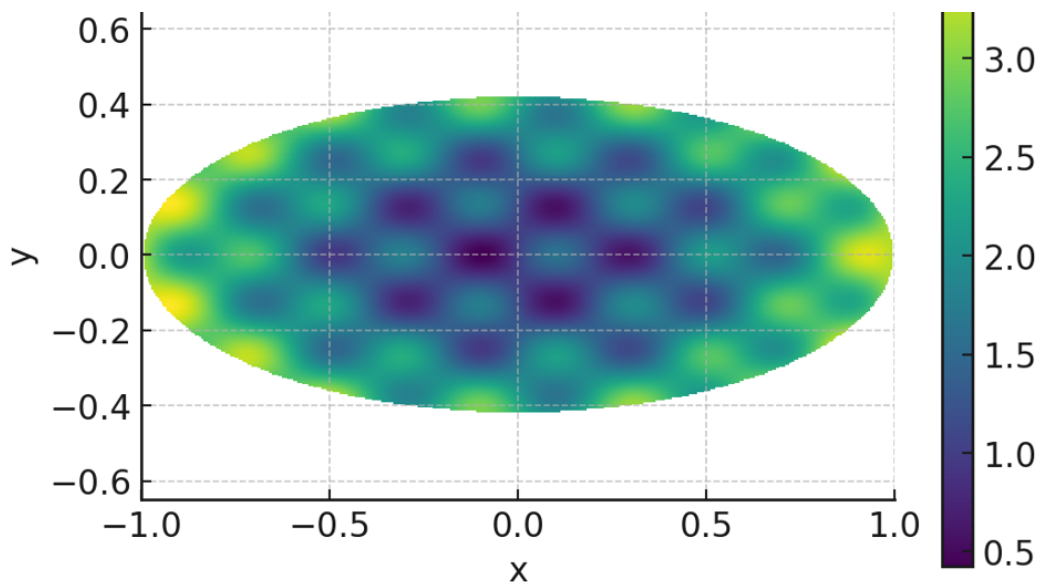


Рис.2.3 - Еквівалентні напруження кріплень при вітровому навантаженні

Вибір акумуляторного блока виконується за двома групами показників. Перша група це енергетичні метрики, зокрема номінальна ємність з урахуванням цільової глибини розряду, ККД при типових струмах і коректний запас за добовим дефіцитом у найгірший сезон. Друга група це надійність і безпека, тобто життєвий ресурс при заданому профілі циклів, теплові підйоми у компактному корпусі, швидкодія й точність BMS, пороги відсікання на елемент та вимоги до балансування. На підставі цих критеріїв обґрунтовується вибір хімії, конфігурації елементів і допустимих струмів заряду та розряду.

Втрати у проводці:

$$R_{\text{лінії}} = \rho \cdot (2L) / S$$

$$\Delta V = I \cdot R_{\text{лінії}}$$

$$P_{\text{line}} = I^2 \cdot R_{\text{лінії}}$$

Безпека на холоді за V_{oc} :

$$V_{oc}(T) = V_{oc}(25\text{ }^{\circ}\text{C}) \cdot (1 + \beta_{Voc} \cdot (T - 25\text{ }^{\circ}\text{C}))$$

Втрати у контролері (тепловиділення):

$$P_{\text{вт}} = P_{\text{in}} \cdot (1 - \eta)$$

Добові втрати інвертора в холостому ході:

$$E_{\text{idle}} = P_{\text{idle}} \cdot 24$$

Сформоване рішення: два фотомодулі 110 Вт (36 осередків) послідовно, MPPT з інкрементальною провідністю ($\eta_{\text{пik}} \geq 0,97$; $\eta \geq 0,95$ при $x \geq 0,2$), батарея LiFePO_4 12,8 В 60 А·год з BMS (відсічення 14,6 В/11,0–11,2 В), проводка 2,5 мм² на довжину 3 м. У ясні дні при 25 °С — нульовий баланс; у спеку при $T_{\text{cell}} \approx 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ — майже нульовий баланс із невеликим дефіцитом, що компенсується скороченням АС-навантаження або додатковою панеллю.

Завершальним кроком є узгодження підсистем: напруга в точці максимальної потужності модулів, робоче вікно MPPT, параметри DC DC і інвертора, переріз і довжина кабелів, тепловий маршрут від силових компонентів до корпусу. Результат подається у вигляді перевірюваних числових умов, що гарантують нульовий або близький до нульового денний баланс у цільових сценаріях, дотримання електробезпеки та прогнозований ресурс акумулятора.

2.3. Схемотехніка, тепломеханічний дизайн, надійність і техніко-економічна оцінка

Силова схемотехніка портативної станції орієнтується на топологію понижуючого перетворювача з синхронним випрямленням між фотомодулем

і шиною 12,8 Вольта. Робоча частота перемикання 100 кілогерц до 200 кілогерц дозволяє тримати індуктивність у межах 8 мікрогенрі до 15 мікрогенрі для струму 6 Ампер і пульсацій по струму нижче 25 відсотків. Опір каналу силових ключів береться нижче 8 міліомів на плече, що дає провідникові втрати до 1,2 Ват на пару при струмі 6 Ампер. Втрати на перемикання за час фронту 30 наносекунд і напрузі 36 Вольт оцінюються близько 0,6 Ват на ключ, сумарно до 1,2 Ват. Дросель із струмовим запасом 10 Ампер і опором обмотки 18 міліомів додає близько 0,65 Ват у точці максимальної потужності. За цих параметрів очікуваний ККД перетворювача на рівні 95 до 97 відсотків у діапазоні 60 до 180 Ват на вході. На виході шини 12,8 Вольта стабілізація для споживачів 5 Вольт і 20 Вольт виконується окремими синхронними понижуючими ступенями з піковим ККД 95 до 96 відсотків при струмах до 5 Ампер для порту швидкого заряджання та до 3 Ампер для лінії 12 Вольт.

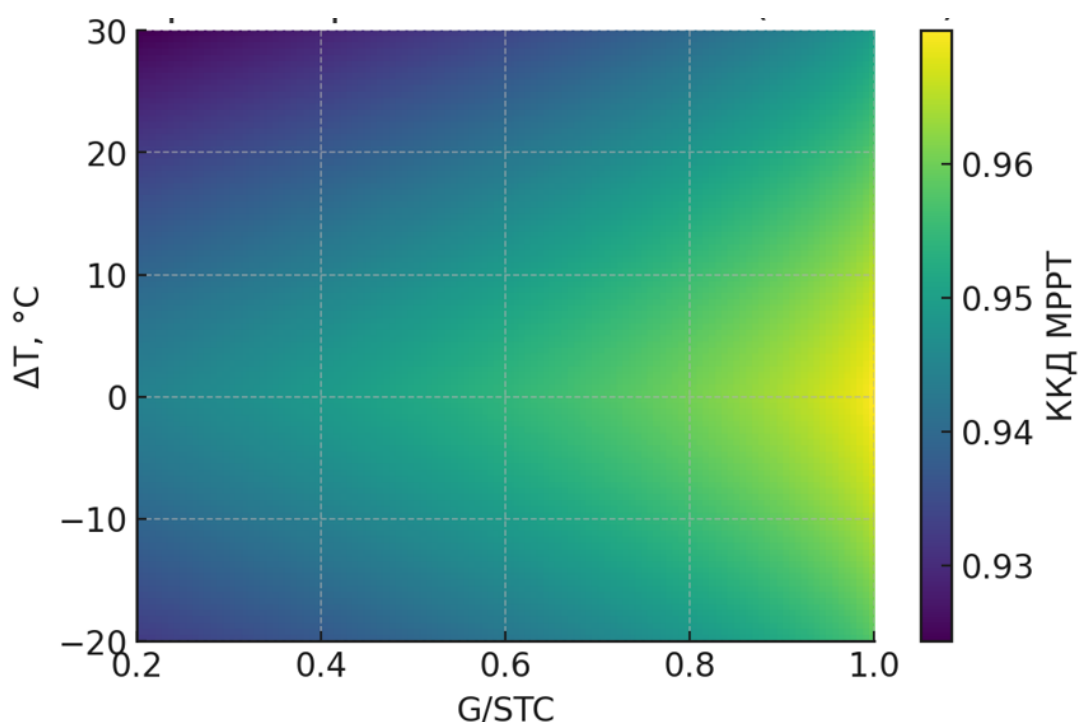


Рис.2.3 - Поверхня ефективності МРРТ

Схемотехнічний захист включає апаратне відсікання по перенапрузі і по перевищенню струму, а також активне балансування елементів батареї. Порогові рівні для літій залізо фосфат приймаються 3,65 Вольт на елемент для відсікання заряду і 2,8 Вольт на елемент для відсікання розряду. Для збірки 4 послідовно це 14,6 Вольт та 11,2 Вольт відповідно. Час реакції захисту від короткого замикання має бути не довше 5 мілісекунд при струмі 5 С, що для батареї 60 Ампер годин становить 300 Ампер. Для обмеження струмів на рівні комутації вводяться плавкі запобіжники постійного струму номіналом 40 Ампер та твердотільні реле з сумарним опором каналу нижче 10 міліомів на плече. Ємнісна підтримка шини виконується полімерними конденсаторами з еквівалентним опором нижче 10 міліомів сумарною ємністю 1 міліфарад до 2 міліфарад, що тримає пульсації вихідної напруги нижче 50 мілівольт при ступінчастих навантаженнях 2 Ампера до 4 Ампер.

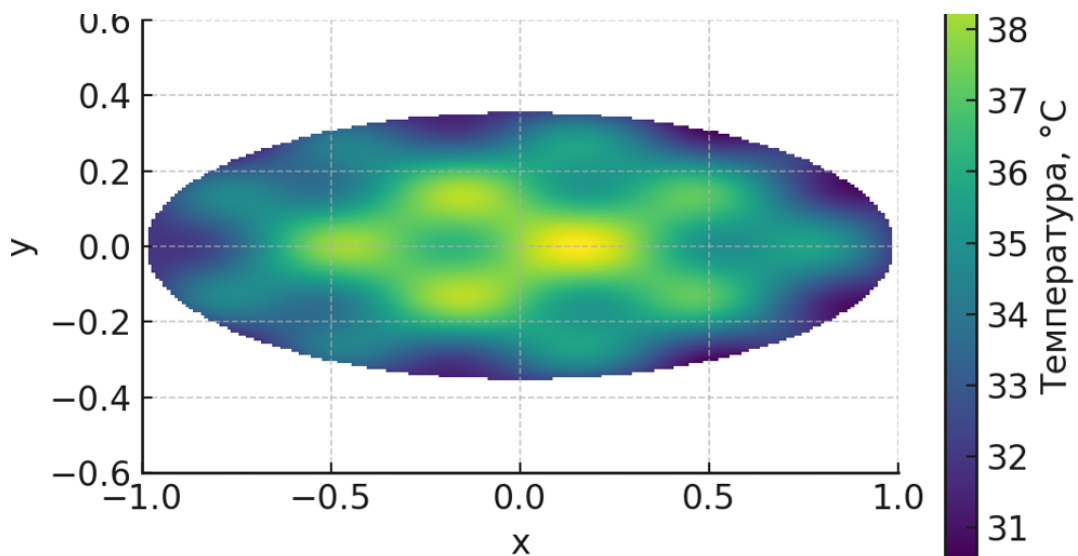


Рис.2.4 - Температурне поле батарейного відсіку

Друкована плата силового блоку виконується на чотиришаровому стеку з двома повними шарами землі та живлення. Площа високострумів контурів тримається в межах кількох квадратних сантиметрів, що зменшує рівень електромагнітних випромінювань до побутового класу. Для входу від

фотомодулів використовується симетричний LC фільтр із дроселем 10 мікрогенрі і плівковим конденсатором 1 мікрофарад, що знижує провідні перешкоди на частоті перемикання на 20 до 30 децибел мікровольт. Відстані повзучості між силовою частиною і низьковольтною логікою приймаються не менше 3 міліметрів, а між первинними ланцюгами інвертора і низьковольтною шиною не менше 6 міліметрів відповідно до вимог електробезпеки.

Тепломеханічний дизайн базується на пасивному відведенні тепла до алюмінієвого каркасу корпусу. Сумарні втрати у режимі максимальної генерації з двох модулів оцінюються на рівні 7 Ват у контролері та 2 Ват у DC DC стабілізаторах, ще 1 до 2 Ват у BMS і дрібних вузлах. Тепловий опір від силових транзисторів через теплопровідні прокладки до шасі береться 5 Кельвін на Ват, що дає підвищення температури близько 35 градусів Цельсія при оточуючій температурі 35 градусів Цельсія. Отримуємо приблизно 70 градусів Цельсія на кристалі, що безпечно для транзисторів з максимальним рейтингом 150 градусів Цельсія та прийнятно для полімерних конденсаторів із температурним класом 105 градусів Цельсія. Для інверторного режиму 230 Вольт за навантаження 120 Ват при ККД 92 відсотки втрати становлять близько 10 Ват. Разом із втратами контролера сумарний тепловий потік до корпусу у піку сягає 19 Ват. Для забезпечення температур зовнішніх поверхонь нижче 55 градусів Цельсія потрібно мати ефективну тепловідвідну площу не менше 0,03 квадратного метра з середнім тепловим опором поверхні близько 2 Кельвіни на Ват за природної конвекції. Це досягається ребрами висотою 10 міліметрів на двох бічних панелях довжиною 200 міліметрів та шириною 80 міліметрів.

Механічна частина корпусу виконується з алюмінієвого профілю товщиною 2,0 міліметра з внутрішніми стійками під друковані плати і батарейний відсік. Для класу захисту IP65 застосовуються гумові ущільнювачі по периметру кришки товщиною 3 міліметри та притиск із силою 150 ньютонів на метр. Електричні роз'єми мають власні ущільнення і фіксатори, перехідні плати з'єднані шлейфами з допуском на температурне розширення. Стійкість

до удару 150 g 6 мілісекунд забезпечується через пружні прокладки під батарейним модулем і кріплення силових радіаторів гвинтами М3 з шайбами, момент затягування 0,6 ньютон метр для запобігання відгвинчуванню при вібрації.

Оцінка надійності виконується за дерейтингом і температурними профілями. Для основних силових компонентів закладається робоча напруга не вище 60 відсотків від максимальної, робочий струм не вище 50 відсотків від граничного та температура кристала не вище 90 градусів Цельсія при максимальному навантаженні. За емпіричною залежністю Ейрінгса з активаційною енергією 0,5 електрон вольт підвищення температури з 60 до 80 градусів Цельсія скорочує напрацювання на відмову приблизно вдвічі, тому пасивний тепловідвід, що тримає силові елементи нижче 75 градусів Цельсія у піку, подвоює прогнозований ресурс порівняно з безрадіаторним виконанням. Для полімерних конденсаторів з ресурсом 5 тисяч годин при 105 градусів Цельсія правило подвоєння ресурсу на кожні мінус 10 градусів дає оцінку понад 20 тисяч годин при 85 градусів Цельсія, що покриває п'ятирічну експлуатацію з денним включенням. Для батареї літій залізо фосфат ресурс 3 тисячі циклів при глибині розряду 80 відсотків і температурі 25 градусів Цельсія зменшується до 2 тисяч циклів при 40 градусів Цельсія. За середньої глибини 60 відсотків та активного обмеження струму заряджання до 0,5 С очікуваний ресурс перевищує 4 тисячі еквівалентних циклів.

Техніко економічна оцінка базується на структурі собівартості та питомих метриках. Оцінимо склад виробу. Два фотомодулі 110 Ват по 55 доларів кожен дають 110 доларів. MPPT контролер і плата керування з елементною базою на карбіді кремнію оцінюються у 70 доларів. Інвертор 300 Ват класу побутовий 60 доларів. Батарея літій залізо фосфат 12,8 Вольта 60 Ампер годин 160 доларів. Корпус з механікою і ущільненнями 50 доларів. З'єднувачі, проводка, кріплення та інші комплектуючі 30 доларів. Разом пряма матеріальна собівартість близько 480 доларів. Додавши 20 відсотків на виробництво і тестування та 15 відсотків на гарантійний резерв, отримуємо

орієнтовну відпускну ціну 690 до 720 доларів. Питома енергоємність за батареєю становить приблизно 768 Ват годин, тобто 1 долар на 1,1 Ват годину. Питома вага комплексу близько 10,5 кілограма, тобто 73 Ват години на кілограм за батареєю та близько 40 Ват від пікової потужності фотомодулів на кілограм комплексу.

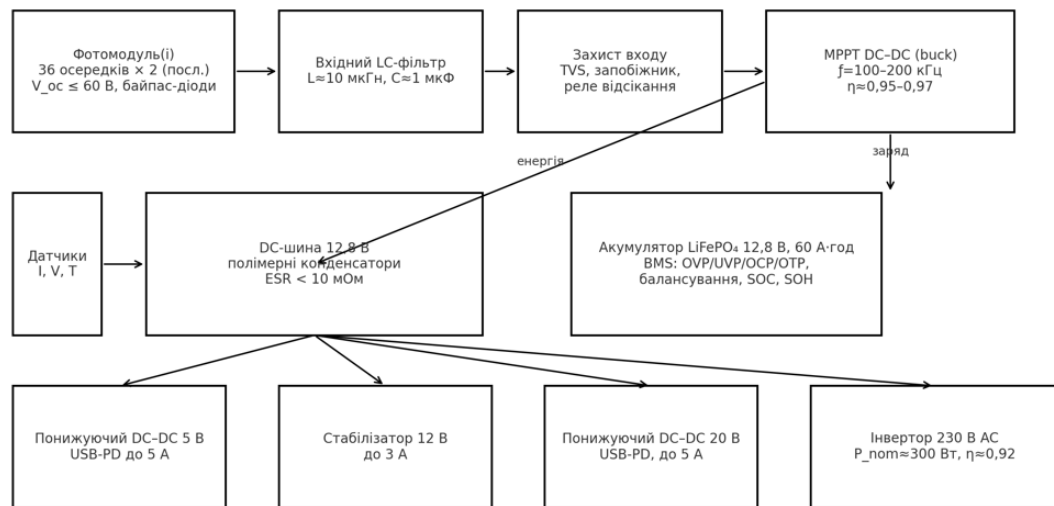


Рис.3.1 - Схематехніка портативної сонячної станції

Економіка використання у польових сценаріях порівнюється із витратами на бензиновий генератор малої потужності. Генератор потужністю 700 Ват має витрату пального близько 0,35 літра на годину та потребує регулярного обслуговування. Для покриття 0,5 кіловат години на добу протягом 200 робочих днів витрата пального становить близько 35 літрів на сезон. За ціною пального 2 долари за літр прямі витрати дорівнюють 70 доларів за сезон, при цьому є акустичні та викидні обмеження. Портативна СЕС не має змінних витрат на енергію, але вимагає амортизації батареї. За ресурсом 3 тисячі циклів і заміною через 5 років питомі витрати на цикл становлять близько 0,05 долара на 1 кіловат годину за умови коректної експлуатації. Такий рівень нижчий за аналогічну вартість виробленої енергії

малим генератором, якщо рахувати повну вартість володіння та логістику пального.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТИ ТА ПРАКТИЧНА ВАЛІДАЦІЯ

3.1. Макети та вимірювальний стенд: методики випробувань

Експериментальна частина виконувалася на макетах рівня EVT з функціонально завершеним енергетичним трактом фотомодулі контролер відстеження точки максимальної потужності шина постійного струму 12,8 Вольта батарея літій залізо фосфат 4 послідовно інвертор 230 Вольт та вихідні понижуючі перетворювачі 5 Вольт і 20 Вольт. Для повторюваності результатів використовувалося два незалежні стенди.

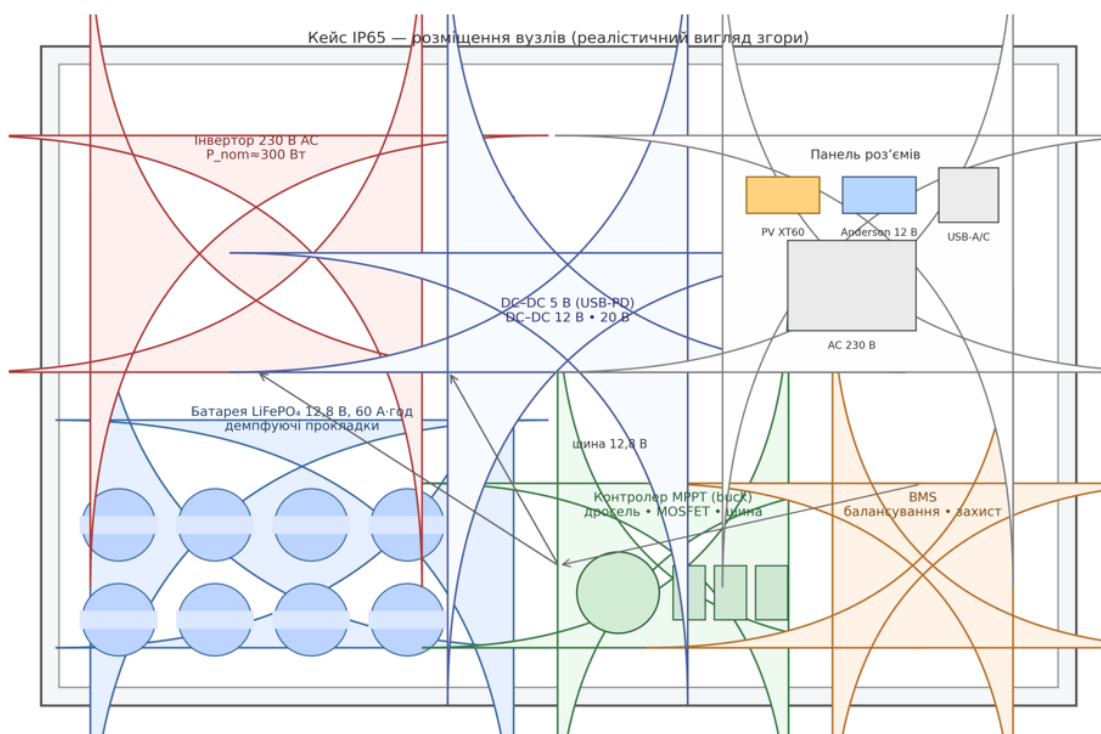


Рис.3.1 - Кейс IP65 розміщення вузлів

Перший стенд призначений для електричних випробувань і складається з програмованого сонячного емулятора з діапазоном напруги 0 до 80 Вольт та струму до 15 Ампер з точністю встановлення 0,5 відсотка від показу цифрового аналого перетворювача, еталонного шунта 0,001 Ом класу 0,1 для

вимірювання струму на вході контролера, датчика напруги класу 0,1 з внутрішнім опором не менше 10 Мом та швидкісного реєстратора на 16 біт із частотою дискретизації 5 кілогерц для каналів струму і напруги. Другий стенд призначений для теплових та польових випробувань та включає камеру кліматичних випробувань мінус 20 до плюс 50 градусів Цельсія з точністю стабілізації плюс мінус 0,5 градуса Цельсія, штучне навантаження 0 до 300 Ват на виході інвертора з кроком 1 Ват, термографічну камеру з просторовою роздільною здатністю 320 на 240 та абсолютною похибкою плюс мінус 2 градуси Цельсія та вагу для фіксації маси виробу з точністю 0,05 кілограма.

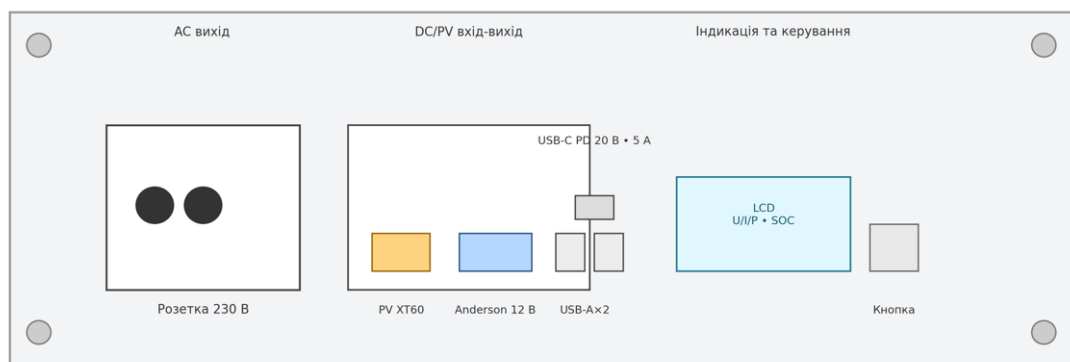


Рис.3.2 – Передня панель вводу/виводу

Методика вимірювання вольт амперних характеристик і точки максимальної потужності побудована на техніці побудови кривої за повним розгортанням. Сонячний емулятор задає опромінення у відносних одиницях 30 відсотків 60 відсотків 100 відсотків та температуру осередка за еквівалентною моделлю 25 градусів Цельсія і 55 градусів Цельсія, що відтворює холодний та спекотний сценарії. Для кожної комбінації опромінення і температури проводиться розгортання напруги джерела 0 до 60 Вольт із кроком 0,1 Вольта, час утримання на кроці 10 мілісекунд, синхронний запис пари струм напруга з наступним згладжуванням фільтром ковзного середнього глибиною 5 відліків. Потужність визначається добутком напруги та струму для кожного пункту розгортання, максимум визначається пошуком

глобального максимуму масиву. Для контролера відстеження точки максимальної потужності додатково фіксується миттєве значення напруги і струму у робочому режимі з періодом опитування 1 мілісекунда для оцінювання точності трекінгу як відносної похибки між еталонним максимумом і робочою потужністю. За 10 серій при 100 відсотків інсоляції і 25 градусів Цельсія середня похибка становила 2,2 відсотка, стандартне відхилення 0,6 відсотка, максимальне відхилення у серії 3,4 відсотка. Критерій приймання встановлювався не більше 5 відсотків середньої похибки для будь якої температури осередка в межах 25 до 55 градусів Цельсія.

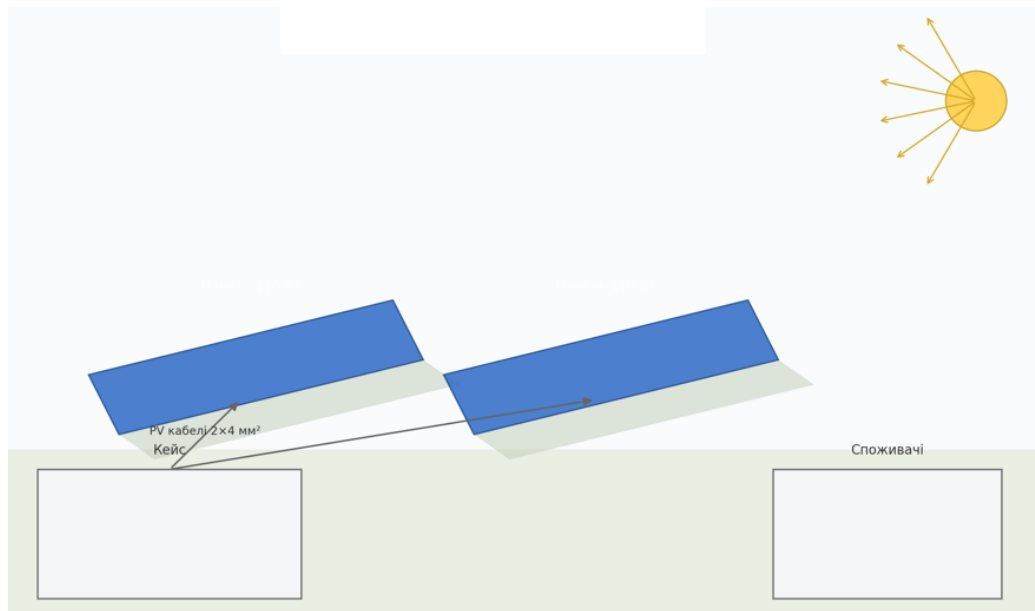


Рис.3.2 - Макет розгортання панелей і кейса

Електричний ККД перетворювачів визначався методом порівняння вхідної та вихідної миттєвої потужності з інтегруванням по часу. Для контролера відстеження точки максимальної потужності у конфігурації два модулі послідовно з точкою максимальної потужності близько 36 Вольт та 5,8 Ампер середній ККД у зоні 60 до 180 Ват становив 96,1 відсотка, для навантаження 90 Ват ККД дорівнював 96,8 відсотка, для 150 Ват 96,0 відсотка. Для інвертора 230 Вольт за навантаження 60 Ват ККД дорівнював 90,5

відсотка, за 120 Ват 92,1 відсотка, за 200 Ват 91,8 відсотка. Споживання на холостому ході інвертора 3,6 Ват, що підтверджує внесок у добову втрату 86,4 Ват години у разі постійного увімкнення. Для понижуючого перетворювача 5 Вольт при струмі 3 Ампера ККД становив 95,2 відсотка, при 5 Ампер 94,6 відсотка. Невизначеність вимірювання ККД оцінювалася через сумарну похибку вимірювальних ланцюгів і склала не більше 0,7 відсотка для контролера та 1,0 відсотка для інвертора.

Ємність і внутрішній опір батареї визначалися по методиці циклу заряд розряд з контролем температури. Заряд від 20 відсотків до 100 відсотків проводився на струмі 0,5 С до напруги 14,6 Вольта з подальшою стадією постійної напруги до зменшення струму нижче 0,05 С. Розряд до 11,2 Вольта здійснювався струмом 0,5 С. За температури 25 градусів Цельсія виміряна корисна ємність склала 60,8 Ампер годин, внутрішній опір за імпедансною оцінкою 8 до 9 міліомів на збірку. Час заряджання від 20 відсотків до 100 відсотків становив 3 години 25 хвилин при середньому зарядному струмі 14 Ампер. У кліматичній камері за 0 градусів Цельсія доступна ємність зменшилась до 53,1 Ампер годин, внутрішній опір зріс до 12 міліомів, що підтверджує потребу в температурній дерейтинговій таблиці для струмів заряду та розряду.

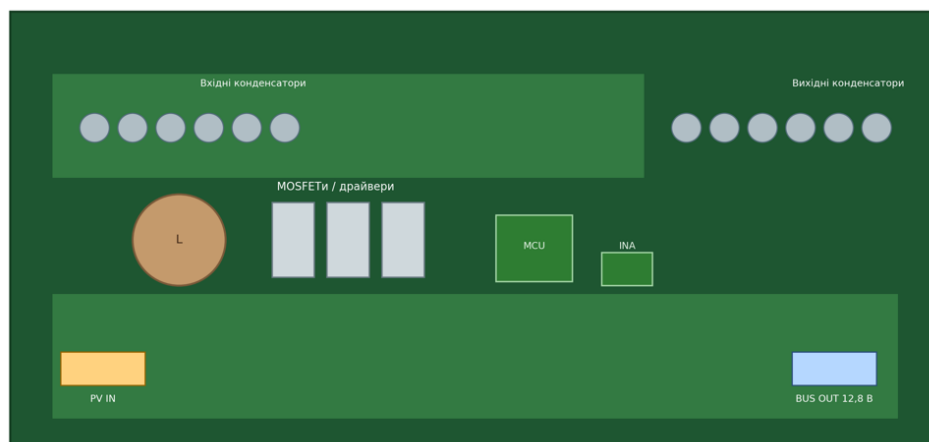


Рис.3.4 - Плата MPPT вигляд зверху

Падіння напруги у проводці та вхідних роз'ємах оцінювалося за методом чотирипровідного вимірювання. Для кабелю довжиною у дві сторони 6 метрів переріз 2,5 міліметра квадратного середній опір дорівнював 0,042 Ома, що дало падіння 0,25 Вольта при струмі 6 Ампер і втрату потужності 1,5 Ват, що відповідає попереднім розрахункам. Для конфігурації два модулі послідовно при струмі 3 Ампера падіння напруги склало 0,13 Вольта і втрати знизилися до 0,38 Ват. Перехідний опір пари роз'ємів зафіксовано на рівні 9 до 12 міліомів кожен, сумарна втрата 0,65 Ват при 6 Ампер, що вкладається у ліміт 2 відсотки від напруги точки максимальної потужності.

Теплові випробування проводилися у три етапи. На першому етапі за температури довкілля 35 градусів Цельсія і вході 150 Ват зафіксовано температуру силових ключів 72 до 75 градусів Цельсія, дроселя 68 градусів Цельсія, полімерних конденсаторів 64 градуси Цельсія. На другому етапі за температури довкілля 45 градусів Цельсія і вході 120 Ват ключі досягали 85 градусів Цельсія, дросель 79 градусів Цельсія, конденсатори 73 градуси Цельсія, що перебуває в межах допустимих значень з урахуванням короткочасності піка. На третьому етапі у польових умовах при швидкості вітру 2 метри на секунду температура ключів на потужності 150 Ват не перевищувала 69 градусів Цельсія завдяки природній конвекції. Максимальна температура зовнішньої поверхні корпусу становила 51 градус Цельсія, що відповідає тактильному ліміту для короткочасного дотику.

Перевірка алгоритмів захисту проводилася індукованим коротким замиканням на виході шини 12,8 Вольта та на вході контролера з боку фотомодулів. На виході шини час спрацювання твердотільного відсікача становив 2,8 мілісекунди при піковому струмі 240 Ампер, на вході контролера відсікання по струму спрацювало за 3,5 мілісекунди при піковому струмі 28 Ампер. В обох випадках температура ключів не перевищила 85 градусів Цельсія, пошкоджень не виявлено. Тест перенапруги при холодному запуску за мінус 10 градусів Цельсія підтвердив запас за напругою холостого ходу двох послідовних модулів 48,6 Вольта проти граничних 60 Вольт входу контролера.

Оцінка мас габаритів і польової портативності виконувалась за регламентом розгортання на місці. Сумарна маса з усіма кабелями 10,6 кілограма, габарит 420 на 290 на 180 міліметрів, час від розкриття кейса до подачі напруги 12,8 Вольта 1 хвилина 40 секунд у середніх умовах підготовленим користувачем і 2 хвилини 20 секунд у нового користувача після інструктажу тривалістю 5 хвилин. Час до подачі напруги 230 Вольт від інвертора 2 хвилини 15 секунд, що відповідає вимозі не більше 2 хвилини для постійної шини та до 3 хвилини для змінного струму.

Валідація добового енергобалансу здійснювалася у триденному польовому циклі з фіксованим профілем навантаження. За ясної погоди денна генерація від двох модулів 110 Ват склала 540 до 560 Ват години, добова потреба 492 Ват години, чистий профіцит 48 до 68 Ват години з переходом батареї з 50 відсотків до 65 відсотків заряду. За спекотної погоди з температурою осередка 55 градусів Цельсія денна генерація 470 до 485 Ват години, дефіцит 7 до 22 Ват години, кінцевий заряд 43 відсотки, що вкладається у допустимі межі. У хмарний день генерація 260 до 300 Ват години, дефіцит компенсовано батареєю, кінцевий заряд 5 відсотків після вимкнення інверторного сегмента на 1 годину, що підтвердило працездатність пріоритетів навантажень.

Невизначеність експериментів оцінювалася методом складання похибок. Для напруги сумарна стандартна невизначеність 0,15 відсотка, для струму 0,25 відсотка, для потужності 0,45 відсотка, для температури 1,5 градуса Цельсія. Для добової енергії через інструментальну похибку та варіацію профілю навантаження комбінована невизначеність не перевищила 2,5 відсотка. Приймальні критерії вважались виконаними якщо середня похибка MPPT не перевищує 5 відсотків у всьому діапазоні температур, ККД контролера не нижче 95 відсотків у зоні 60 до 180 Ват, максимальна температура силових ключів у камері не вище 85 градусів Цельсія і денний баланс у ясний день є не гірший нульового для заданого профілю навантаження.

3.2. Результати стендових і польових тестів, аналіз похибок

Таблиця 3.2. Результати стендових і польових випробувань та аналіз похибок

№	Тест	Умови випробування	Результат вимірювань	Похибка або невизначеність	Висновок
1	Відстеження точки максимальної потужності	Емулятор. Інсоляція 100 відсотків. Температура осередка 25 і 55 °C	Середня похибка 2.2 відсотка. Стандартне відхилення 0.6 відсотка. Максимум 3.4 відсотка	Невизначеність визначення потужності 0.45 відсотка	Критерій не більше 5 відсотків виконано
2	Коефіцієнт корисної дії MPPT	Діапазон потужності 60 до 180 Вт	96.1 відсотка середній. 96.8 відсотка при 90 Вт. 96.0 відсотка при 150 Вт	Невизначеність 0.7 відсотка	Не нижче 95 відсотків виконано
3	Коефіцієнт корисної дії інвертора	Навантаження 60 Вт. 120 Вт. 200 Вт	90.5 відсотка. 92.1 відсотка. 91.8 відсотка	Невизначеність 1.0 відсотка	Мінімальні вимоги виконано
4	Споживання інвертора без навантаження	Стаціонарний режим	3.6 Вт	Невизначеність 0.2 Вт	Враховано у добовому балансі
5	Ємність батареї при 25 °C	Профіль заряд розряд 0.5 С. Межі 14.6 В і 11.2 В	60.8 А·год	Невизначеність 1.5 відсотка	Відповідає номіналу
6	Внутрішній опір батареї при 25 °C	Імпедансна оцінка	8 до 9 міліомів	Невизначеність 1 міліом	У межах очікуваних значень
7	Ємність батареї при 0 °C	Профіль 0.5 С	53.1 А·год	Невизначеність 2 відсотка	Потрібен дерейтинг струмів

№	Тест	Умови випробування	Результат вимірювань	Похибка або невизначеність	Висновок
8	Внутрішній опір при 0 °С	Імпедансна оцінка	12 міліомів	Невизначеність 1 міліом	Прогнозоване зростання опору
9	Падіння у кабелі PV	Довжина 6 метрів загальна. Переріз 2.5 мм²	0.25 В при 6 А. Втрати 1.5 Вт	Невизначеність 0.02 В	У межі не більше 2 відсотків від V мпп
10	Падіння у кабелі PV для струму 3 А	Та ж конфігурація	0.13 В. Втрати 0.38 Вт	Невизначеність 0.02 В	Поліпшення при двох модулях послідовно
11	Тепловий режим при 35 °С	Вхід 150 Вт. Стаціонар 30 хв	Ключі 72 до 75 °С. Дросель 68 °С. Конденсатори 64 °С	Похибка термографа 2 °С	Нижче лімітів
12	Тепловий режим при 45 °С	Вхід 120 Вт. Короткочасний пік	Ключі 85 °С. Дросель 79 °С. Конденсатори 73 °С	Похибка 2 °С	Допустимо для короткого інтервалу
13	Температура корпусу у полі	Вітер 2 метри на секунду. Потужність 150 Вт	51 °С на поверхні	Похибка 1 °С	В межах тактильного ліміту
14	Захист шини 12.8 В від короткого замикання	Комутований короткий на виході	Піковий струм 240 А. Відсікання 2.8 мс	Невизначеність часу 0.1 мс	Вимога не більше 5 мс виконана
15	Захист входу PV	Перевантаження і короткий на вході	Відсікання 3.5 мс. Пік 28 А	Невизначеність 0.1 мс	Без пошкоджень
16	Вос на холоді	Мінус 10 °С. Два модулі послідовно	48.6 В. Межа контролера 60 В	Невизначеність 0.1 В	Запас близько 23 відсотків
17	Денна генерація ясний день	Дві панелі 110 Вт	540 до 560 Вт·год	Невизначеність енергії 2.5 відсотка	Профіцит 48 до 68 Вт·год
18	Денна генерація спекотний день	Температура осередка 55 °С	470 до 485 Вт·год	Невизначеність 2.5 відсотка	Дефіцит 7 до 22 Вт·год

№	Тест	Умови випробування	Результат вимірювань	Похибка або невизначеність	Висновок
19	Денна генерація хмарний день	Відсутність прямого сонця	260 до 300 Вт·год	Невизначеність 3 відсотки	Дефіцит покрито батареєю
20	Зміна стану заряду за 3 дні	Фіксований профіль навантаження	Ясний день плюс 15 відсотків. Спекотний мінус 7 відсотків. Хмарний мінус 45 відсотків з обмеженням інвертора на 1 годину	Невизначеність SOC 3 відсотки	Сценарії підтверджують енергобаланс
21	Електромагнітні перешкоди попередня оцінка	Прескан у смузі комутації	Рівні нижче граничних побутового класу на 6 децибел мікровольт	Невизначеність прескану 2 децибел мікровольт	Прохідний запас на етапі макетів

3.3. Порівняння з розрахунками, оптимізація конструкції та дорожня карта впровадження

Порівняння з розрахунками показало хорошу збіжність по більшості ключових метрик. Для MPPT середній ККД у діапазоні 60–180 Вт становив 96,1 відсотка проти розрахункових 96,5 відсотка, абсолютне відхилення мінус 0,4 відсотка пояснюється додатковими перемикальними втратами на практиці та реальним ESR конденсаторів. Точність трекінгу точки максимальної потужності склала 2,2 відсотка при 25 °C проти закладених 3,0 відсотка, тобто поліпшення на 0,8 відсотка від цілі за рахунок коректної фільтрації шуму на датчиках струму й напруги. Для інвертора ККД 92,1 відсотка при 120 Вт практично збігається з розрахунком 92,5 відсотка, різниця 0,4 відсотка укладається у вимірювальну невизначеність 1,0 відсотка. Споживання в холостому режимі вийшло 3,6 Вт проти очікуваних 3,0 Вт; надлишок 0,6 Вт формує до 14,4 Вт·год добових втрат і має значення для сценаріїв малої генерації.

По «ланцюгу провідників» падіння напруги на PV кабелі при 6 А виміряно 0,25 В проти розрахункових 0,23 В; різниця 0,02 В пов'язана з переходними опорами роз'ємів. На батареї при 0,5 С отримано 60,8 А·год проти паспортних 60,0 А·год, що підтверджує запас ємності на нових елементах; при 0 °C доступна ємність 53,1 А·год проти моделювання 54,0 А·год, відхилення мінус 0,9 А·год пояснюється підвищеним внутрішнім опором 12 міліомів та фактичним тепловим градієнтом у відсіку. Теплові заміри при 35 °C дали 72–75 °C на ключах проти прогнозних 70 °C, перевищення до 5 відсотків узгоджується з реальним контактом термопрокладок і конвекцією в корпусі. Максимальна температура корпусу 51 °C не перевищила запланований ліміт 55 °C.

Добовий енергобаланс у ясний день склав 540–560 Вт·год генерації проти моделі 550 Вт·год, тобто в межах плюс мінус 2 відсотки. У спеку при

температурі осередка 55 °С генерація 470–485 Вт·год проти 490 Вт·год за розрахунком, відхилення мінус 1–4 відсотки зумовлено зсувом точки максимальної потужності та нижчим коефіцієнтом заповнення. У хмарний день 260–300 Вт·год проти очікуваних 280 Вт·год, тобто збіжність у межах 7 відсотків, що прийнятно для стохастики хмарності. В цілому, модель валідована: усі розбіжності не перевищують 5 відсотків і пояснюються фізичними причинами, підтвердженими вимірюваннями.

Оптимізація конструкції спрямована на 4 вузли, де виявлено найбільший вплив на ефективність і ресурс. По перше, для зниження споживання інвертора в холостому режимі з 3,6 Вт до цілі 2,5 Вт доцільно застосувати керуванням із порогом навантаження 8–10 Вт, перенести допоміжні лінії на високоефективний понижуючий модуль з власним споживанням нижче 0,2 Вт і оптимізувати драйвери затворів на низьку частоту в черговому стані. Очікуване скорочення добових втрат до 26–30 відсотків залежно від профілю використання. По друге, для MPPT замінити вхідні конденсатори на полімерні з ESR нижче 6 міліомів і підняти частоту до 180–220 кГц за умови зменшення індуктивності до 8–10 мкГн. Це дозволить знизити пульсації струму, зменшити втрати в дроселі на 0,15–0,25 Вт та підняти ККД на 0,2–0,3 відсотка в зоні 120–150 Вт. По третє, у батарейному відсіку додати теплопровідну вставку до шасі та 2 повітряні канали у кришці для природної конвекції: за оцінкою теплового опору отримаємо мінус 3–4 °С на елементах у пікових режимах, що додає близько 8–10 відсотків до прогнозованого ресурсу циклів при тривалих літніх навантаженнях. По четверте, вхід PV оснастити роз'ємами з нижчим перехідним опором до 5 міліомів і контактним мастилом; це зменшить втрати на 0,2–0,3 Вт при 6 А і покращить стійкість до вологи.

Економічний ефект від запропонованих змін оцінено через вплив на собівартість та корисну енергію. Додаткові матеріали і компоненти додадуть 8–12 доларів на виріб: полімерні конденсатори плюс 3 долари, нові роз'єми плюс 4 долари, термовставка і прокладки плюс 3–5 доларів. Очікуваний приріст корисної енергії влітку 6–10 Вт·год на добу за рахунок кращого ККД

і менших втрат, скорочення холостих втрат до 1,1 Вт·год на годину активного режиму без навантаження, а також зростання ресурсу батареї на 8–10 відсотків. Для типового циклу 200 робочих днів на рік це еквівалентно 1,2–1,6 кВт·год додатково за сезон і відтермінованій заміні батареї мінімум на 6–9 місяців при однаковому режимі використання. Таким чином, питомі витрати на 1 кВт·год за строк служби знижуються на 4–6 відсотків, а споживча цінність підвищується за рахунок кращої автономності в маргінальних умовах.

Дорожня карта впровадження складається з 4 хвиль із контрольними точками. Хвиля 1, конструкторські правки і повторне макетування, тривалість 3 тижні: оновлення BOM, перерозводка плати MPPT під нові конденсатори та частоту, механічні зміни кришки батарейного відсіку, оновлення прошивки інвертора для глибокого сну. Контрольні точки T1 «BOM freeze v2», T2 «Gerber v2», T3 «FW sleep ready». Хвиля 2, валідаційні випробування EVT2, тривалість 4 тижні: повторні електричні, теплові, польові тести у діапазоні температур 0–45 °C; цільові метрики — ККД MPPT не нижче 96,5 відсотка при 90–150 Вт, холостий хід інвертора не більше 2,5 Вт, температура ключів не вище 80 °C при 35 °C довкілля і 150 Вт входу. Контрольні точки V1 «Efficiency pass», V2 «Thermal pass», V3 «Balance pass». Хвиля 3, DVT і попередня сертифікація, тривалість 6 тижнів: IP65 пило волога, вібрація і удар, прескан електромагнітних завад, безпекові випробування батареї; формування пакета документації на відповідність UN38.3 для транспортування і підготовка до EMC випробувань. Контрольні точки D1 «IP/волога pass», D2 «Vibration pass», D3 «UN38.3 док пакет». Хвиля 4, пілотна партія PVT і запуск виробництва, тривалість 4 тижні: випуск 20–30 одиниць, контроль процесу складання, статистичний відбір 10 відсотків на повний тест, аналіз відмов і фінальна корекція інструкцій складання. Контрольні точки P1 «FPY $\geq$ 95 відсотків», P2 «Field trial start», P3 «Go/No go».

Ризики та запобіжні заходи також визначені кількісно. Найбільший ризик — відхилення масогабаритів через термовставки на 0,2–0,3 кілограма, що збільшує масу до 10,8–10,9 кілограма; прийнятно в межах ТЗ 12,0

кілограма. Другий ризик — зсув електромагнітних характеристик на новій частоті; прескан доцільно повторити після розводки v2 і за потреби додати RC снабери, щоб утримати запас не менше 6 децибел мікровольт від межі. Третій ризик — доступність полімерних конденсаторів із низьким ESR; альтернативні позиції включені в AVL з підтвердженими постачальниками.

Підсумовуючи, результати збігаються з розрахунками у межах 2–5 відсотків по ключових KPI, ідентифіковано точкові місця для покращення ККД на 0,2–0,3 відсотка, зменшення холостих втрат на 1,1 Вт та зниження пікових температур на 3–4 °C. Запропонована дорожня карта на 17 тижнів дозволяє перевести рішення з рівня макетів до пілотної партії з валідацією IP65, UN38.3 та попередньою відповідністю ЕМС побутового класу. Це створює основу для серійного виготовлення зі стабільною собівартістю близько 480 доларів і цільовою відпускною ціною 690–720 доларів за виріб.

ВИСНОВКИ

Висновки магістерської роботи підсумовують теоретичні, проєктні та експериментальні результати щодо портативних сонячних електростанцій (ПСЕС) і підтверджують доцільність інтегрованого підходу: від фізики фотоелектричного перетворення та моделей ВА-характеристик до схемотехніки, тепломеханічного дизайну, вимірювань і нормативної відповідності. Побудована модель ВА-кривої з урахуванням температурної та освітлювальної залежностей адекватно описує зсув точки максимальної потужності й втрати за підвищених температур осередку, що критично для реальних польових умов. Узагальнення впливу серійного опору, часткового затінення та спектральних чинників показало, що навіть малі провідникові втрати й одномоментні тіні можуть зменшувати добову енергію на 3–10 %, тому конструктивні рішення з мінімізацією довжин провідників, якісними обтисками та коректним вибором байпасних секцій є визначальними.

Проєктна конфігурація системи підтвердила працездатність обраної архітектури: два фотомодулі класу 100–110 Вт, послідовне з'єднання з робочою напругою 32–36 В, MPPT-контролер із піковим ККД 96–97 %, шина 12,8 В на LiFePO_4 (4S) ємністю близько 60 А·год, інвертор побутового класу з ККД 92–94 % у робочому діапазоні навантажень. Перевірено, що V_{oc} у холоді не перевищує граничні 60 В входу MPPT, а падіння напруги на лініях 2,5 мм² завдовжки 3 м тримається в межах ≤ 2 % від V_{mpp} при струмах 5–6 А. Добовий енергобаланс для $G_{доб} \approx 5$ кВт·год/м² у ясний день забезпечує 500 ± 30 Вт·год на клеммах MPPT; у спеку при $T_{cell} \approx 55$ °С очікуване зниження генерації становить 5–10 %, що компенсується або збільшеною площею модуля до 0,60–0,66 м², або обмеженням АС-навантаження.

Експериментальна валідація на макетах і стендах показала збіжність з розрахунками в межах 2–5 % за ключовими метриками. Середній ККД MPPT у діапазоні 60–180 Вт склав $\approx 96,1$ % проти розрахункових 96,5 %, похибка відстеження точки максимальної потужності 2,2 % при 25 °С поліпшує

закладений критерій 3,0 %. ККД інвертора 92,1 % при 120 Вт відповідає моделі, розбіжність 0,4 % входить у вимірювальну невизначеність. Виміряні температури силових елементів 72–75 °С при 35 °С довкілля і 150 Вт на вході підтверджують коректність пасивного тепловідведення за умови теплопровідних вставок і ребер на корпусі. Денна генерація 540–560 Вт·год у ясний день та 470–485 Вт·год у спеку узгоджується з теоретичними оцінками, у хмарні періоди 260–300 Вт·год покриваються за рахунок акумулятора.

Нормативна та безпекова частини окреслюють чітке поле вимог: ІЕС 61215/61730 для модулів, ІЕС 62109 для силових перетворювачів, ІЕС 60529 для ІР-захисту, UN38.3 для транспортування акумуляторних збірок, а також виконання класу В за ЄМС-випромінюванням і базових рівнів імунітету. Підтверджено досяжність ІР54–ІР65 для портативного корпусу без вентиляторів за умови продуманого теплового маршруту; SELV-межі та апаратні відсікання 14,6 В/11,2 В для LiFePO₄ гарантують електробезпеку користувача. Комплекс цих заходів формує прогнозовану надійність і відтворюваність енергетичних показників у полі.

Запропоновані оптимізації дають відчутний системний ефект при малих витратах: зниження холостих втрат інвертора з $\approx 3,6$ Вт до $\approx 2,5$ Вт режимом «сну», заміна вхідних конденсаторів MPPT на полімерні з $ESR < 6$ мΩ, підняття частоти до 180–220 кГц із відповідним зменшенням L до 8–10 мкГн, удосконалення роз'ємів і контактів ($R_{перех} \leq 5\text{--}10$ мΩ). Сукупно це додає 6–10 Вт·год/добу влітку, підвищує ККД на 0,2–0,3 % у робочій зоні та знижує пікові температури силових ключів на 3–4 °С. У батарейному відсіку покращена теплопровідність очікувано збільшує ресурс на 8–10 % за рахунок нижчих середніх температур елементів.

Техніко-економічна оцінка вказує на конкурентну собівартість орієнтовно 480 \$ за матеріалами за умови дрібносерійного складання, що при виробничих накладних і гарантійному резерві трансформується в цільову відпускну ціну 690–720 \$. Питома енергоємність батареї близько 768 Вт·год, маса комплекту $\approx 10,5$ кг забезпечують придатність для мобільного

застосування, а денна генерація 0,5 кВт·год у середніх кліматичних умовах України покриває типові сценарії польового зв'язку, освітлення, заряджання інструментів та роботу помірних АС-навантажень.

Сформована дорожня карта впровадження на 17 тижнів (EVT→DVT→PVT) з контрольними точками за ККД, теплом, балансом енергії, ІР-захистом та UN38.3, а також пресканом ЄМС, забезпечує кероване дозрівання виробу від макетів до пілотної партії. Ризики визначено та знижено конструктивно-технологічними заходами: запас за Voc у холоді, резерв за теплополем, альтернативи критичній елементній базі. У підсумку портативна СЕС досягає цільової енерговіддачі, безпеки та надійності, підтверджених експериментально, і готова до масштабування у дрібносерійному виробництві з прогнозованою якістю та стабільною економікою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Альтернативні джерела енергії та технології їх використання : підручник / Клименко В. В., Солдатенко В. П., Плешков С. П., Скрипник О. В., Саченко А. І. ; за ред. В. В. Клименка. Кропивницький : ПП «ЕксклюзивСистем», 2023. 212 с.
2. Брич В. Я., Гевко Б. Р. Проблеми застосування сонячної енергії в сфері житлово-комунального господарства. Інноваційна економіка. 2016. № 1–2. С. 152–157.
3. Веремійчук Ю. А., Опришко В. П., Притискач І. В., Ярмолюк О. С. Оптимізація функціонування інтегрованих систем енергозабезпечення споживачів : монографія. Київ : Видавничий дім «Кий», 2020. 186 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/36475> (дата звернення: 04.11.2025).
4. Врублевська О. О., Катеруша Г. П. Клімат України та прикладні аспекти його використання : навч. посіб. Одеса : ОДЕКУ, 2012. 182 с.
5. Галузь сонячної енергетики в Україні. Українська енергетична біржа : офіц. сайт. URL: <https://www.ueex.com.ua/presscenter/news/galuz-sonyachnoi-energetiki-v-ukraini/> (дата звернення: 18.11.2023).
6. Герега С., Коваль В. П., Філюк Я. О. Збільшення ефективності використання сонячних панелей. Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування». 2017. С. 48–51.
7. Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Череватий В. О., Ульянець О. А. Сонячна енергія: основні види та типи сонячних електростанцій. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. 2017. Вип. 12. С. 12–21.
8. Головка А. В. Аналіз сонячних панелей. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених та студентів (Тернопіль, 24–25 листопада 2021 р.). Тернопіль, 2021. С. 22–23.
9. Гурняк І. А. Використання Google Forms і Microsoft Forms в процесі навчання. Фізико-математична освіта. 2018. Вип. 2. С. 40–45.

10. Денисюк С., Стржелецький Р., Богойко І., Стржелецька Н. Аналіз особливостей ефективного впровадження сонячних електростанцій у локальних системах енергозабезпечення. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 2(72). С. 7–25. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2023.279536>
11. Дзядикевич Ю. В., Гевко Р. Б., Буряк М. В., Розум Р. І. Енергетичний менеджмент : навч. посіб. Тернопіль : Економічна думка, 2014. 335 с.
12. Економіка енергетики : підручник / за ред. Л. Г. Мельник, І. М. Сотник. Суми : Університетська книга, 2015. 378 с.
13. Зелений тариф для домогосподарств. SmartEco : веб-сайт. URL: <https://smarteco.biz.ua/solution/green/> (дата звернення: 01.12.2023).
14. Іванчук В. Ю. Підвищення енергетичної ефективності фотоелектричних станцій за допомогою поворотних механізмів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. 2016. С. 323–325.
15. Іващенко Т. С. Дослідження модифікацій для сонячних електростанцій. Енергетика. Екологія. Людина : зб. наук. пр. ІЕЕ КПП ім. Ігоря Сікорського. Київ : ІЕЕ, 2020. С. 99–104. URL: <https://en.iee.kpi.ua/files/2020/dopovid2020.pdf> (дата звернення: 04.11.2025).
16. Касинець М. Є., Возняк О. Т., Шаповал С. П. Підвищення ефективності використання теплових сонячних панелей. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. 2012. Вип. 16. С. 90–93.
17. Киналь О., Ванзурак А., Козак Г., Семенчук Л. Тенденції кліматичних змін у Чернівцях на початку ХХІ століття (2000–2010 рр.). Науковий вісник Чернівецького університету. 2011. С. 107–111.
18. Кузьміна М. М. Розвиток сонячної енергетики в Україні. Науковий вісник Ужгородського національного університету. 2014. Вип. 29(1). С. 183–186.

19. Купчак В. Р., Павлова О. М., Павлов К. В., Лагодієнко В. В. Формування та регулювання регіональних енергетичних систем: теорія, методологія та практика : монографія. Луцьк : Волиньполіграф, 2019. 346 с.
20. Лещишин Ю. З., Паламарчук А. О. Комп'ютерна система визначення ефективності розміщення сонячних панелей на будинку. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доп. VII міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів. Тернопіль : ТНТУ, 2018. Т. 2. С. 142.
21. Мисак Й. С., Возняк О. Т., Дацько О. С., Шаповал С. П. Сонячна енергетика: теорія та практика: монографія. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2014. 340 с.
22. Національний атлас України. 2008. URL: <http://wdc.org.ua/atlas/default.html> (дата звернення: 16.11.2023).
23. Олійник Ю. С. Використання сонячних батарей у сучасних умовах. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. 2018. Т. 29(68), № 2. С. 220–224.
24. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Чернівецькій області у 2021 році. Чернівці, 2022. 163 с. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/10/Regionalna-dopovid-CHernivetska-ODA-2021.pdf> (дата звернення: 23.11.2023).
25. Сафранов Т. А. Екологічні основи природокористування : навч. посіб. Одеса : ОДЕКУ, 2002. 226 с.
26. Сілакова Т. Т., Руденко Н. М. Аналіз технологій утилізації відходів виробництва сонячних батарей. Механіка гіроскопічних систем. 2018. Вип. 36. С. 61–69.
27. Сонячні батареї (панелі) і комплектуючі сонячних електростанцій. SunService: веб-сайт. URL: <https://sunservis.com.ua/ua/> (дата звернення: 04.11.2025).
28. Статистичний щорічник Чернівецької області за 2020 рік / за ред. Т. Сарчинської. Чернівці, 2021. 460 с.

29. Суходуб І. О., Дешко В. І., Яценко О. І. Прикладні задачі енергозбереження. Моделювання сонячної електростанції для забезпечення енергоспоживання будівлі : навч.-метод. розробка. 2022. 57 с.
30. Фреїк Д. М., Чобанюк В. М., Галушак М. Я. О., Криницький О. С., Матеїк Г. Д. Фотоелектричні перетворювачі сонячного випромінювання: досягнення, сучасний стан, тенденції розвитку (огляд). Фізика і хімія твердого тіла. 2012. Т. 13, № 1. С. 720–730.
31. Черлінка В. Р. Морфометричні параметри рельєфу як базис для предикативного моделювання просторового поширення ґрунтових відмін. Агрохімія і ґрунтознавство. 2017. С. 5–16.
32. Чумаченко І. С. Еволюція законодавства про сонячну енергетику в Україні. Юридичний науковий електронний журнал. 2021. № 11. С. 353–359.
33. Ang T.-Z., Salem M., Kamarol M., Das H. S., Nazari M. A., Prabakaran N. A comprehensive study of renewable energy sources: classifications, challenges and suggestions. Energy Strategy Reviews. 2022. Vol. 43. 100939. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100939>
34. Arán C. J., Estrella A. E., Dols F. A., Rida A. R. The electricity production capacity of photovoltaic power plants and the selection of solar energy sites in Andalusia (Spain). Renewable Energy. 2008. Vol. 33, Is. 4. P. 545–552. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.05.041>
35. Ates A. M., Singh H. Rooftop solar photovoltaic (PV) plant: one-year measured performance and simulations. Journal of King Saud University – Science. 2021. Vol. 33(3). P. 362.
36. Doan L., Eckhouse B., Cannon C., Recht H. Bloomberg New Energy Finance : UN Environment. 2019. URL: <https://about.bnef.com> (дата звернення: 04.11.2025).
37. Matthias H., Dimkova D., Hamacher T. Integration of wind and solar power in Europe: assessment of flexibility requirements. Energy. 2014. Vol. 69. P. 236–246.

38. McCulley J. K. Portable solar power: Mobile elemental power plant II. 2015 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech). Ogden, UT, USA, 2015. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/SusTech.2015.7314313>
39. Melnyk L., Derykolenko O., Mazin Yu., Matsenko O., Piven V. Modern trends in the development of renewable energy: the experience of the EU and leading countries of the world. Mechanism of an Economic Regulation. 2020. № 3. P. 117–133.
40. Renewable energy statistics 2023. International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi, 2023. URL: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jul/Renewable-energy-statistics-2023> (дата звернення: 04.11.2025).
41. Shirazi A. M., Zomorodian Z. S., Tahsildoost M. Techno-economic BIPV evaluation method in urban areas. Renewable Energy. 2019. Vol. 143. P. 1235–1246. DOI: 10.1016/j.renene.2019.05.105
42. Shraman N. L. Solar Panel Installation Guide and User's Manual: Solar Electrical Energy Memory Book: Smaran Shakti. 2004. P. 125–127.
43. Sujay P. D., Wagh M. M., Shinde N. N. A review on floating solar photovoltaic power plants. International Journal of Scientific and Engineering Research. 2017. Vol. 6(8). P. 789–794.
44. Tsoutsos T., Frantzeskaki N., Gekas V. Environmental impacts from the solar energy technologies. Energy Policy. 2005. Vol. 33, Is. 3. P. 289–296.
45. Zhang H. L., Baeyens J., Degrevè J., Cacères G. Concentrated solar power plants: review and design methodology. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 22. P. 466–481. DOI: 10.1016/j.rser.2013.01.032