

ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

(повне найменування вищого навчального закладу)

ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ

(назва факультету)

КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ І ФІЗИКИ

(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

(рівень вищої освіти)

на тему «Розробка фотоелектричної системи для приватного будинку у с.
Нововоронцовка Херсонської області»

Виконав: студент 4 курсу, групи 4ЕЛ
спеціальності 141. Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка

(код і назва спеціальності)

освітньо-
професійної
програми

Електротехніка та

електротехнології

(назва ОПП)

Хайнус М.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник

к.т.н., доц. Андропова О.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

к.т.н., доц. Мешков Ю.Є.

(прізвище та ініціали)

Хмельницький – 2026 р.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра на тему «Розробка фотоелектричної системи для приватного будинку у с. Нововоронцовка Херсонської області» включає в собі пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка містить 67 сторінок формату А4, 9 рисунків, 8 таблиць, 36 використаних джерел, 14 слайдів електронної презентації, 3 додатки.

Ключові слова: енергоспоживання, відновлювані джерела енергії, акумуляторна батарея, гібридна фотоелектрична система, інвертор, сонячна радіація, фотоелектричний модуль.

Дана кваліфікаційна робота присвячена розробці фотоелектричної системи для приватного будинку, розташованого у Херсонській області. На основі досліджень надходження сонячної радіації, проведеного для місцезнаходження об'єкта, та визначеного енергоспоживання будинку запропоновано гібридну схему фотоелектричної системи, проведено підбір основних компонентів й розрахунок схеми їх підключення, визначено обсяги генерації електроенергії запропонованою системою. Встановлено, що річне вироблення енергії перевищує енергоспоживання, а надлишкова електроенергія підлягає продажу в загальну мережу.

У розділі «Охорона праці» наведено аналіз професійних ризиків і травматизму, визначено параметри мікроклімату відповідно до ДСП 173-96, вибухопожежної небезпеки приміщень та проведено розрахунок штучного і природного освітлення методом коефіцієнта використання світлового потоку, а також розроблено математичний апарат для оцінювання економічної ефективності впроваджених технічних рішень за критеріями підвищення працездатності.

ABSTRACT

Bachelor's qualification work on the topic "Development of a photovoltaic system for a private house in the village of Novovorontsovka of Kherson region" includes an explanatory note and a graphic part. The explanatory note contains 67 pages of A4 format, 9 figures, 8 tables, 36 sources used, 14 slides of an electronic presentation, 3 appendices.

Keywords: energy consumption, renewable energy sources, battery, hybrid photovoltaic system, inverter, solar radiation, photovoltaic module.

This qualification work is devoted to the development of a photovoltaic system for a private house located in the Kherson region. Based on the research of the solar radiation input conducted for the location of the object and the determined energy consumption of the house, a hybrid photovoltaic system scheme was proposed, the main components were selected and their connection scheme was calculated, and the volumes of electricity generation by the proposed system were determined. It was established that the annual energy production exceeds energy consumption, and the excess electricity is subject to sale to the general network.

The section "Occupational Safety" provides an analysis of occupational risks and injuries, determines the parameters of the microclimate in accordance with DSP 173-96, the explosion and fire hazard of the premises and calculates artificial and natural lighting using the luminous flux utilization factor, and also develops a mathematical apparatus for assessing the economic efficiency of the implemented technical solutions according to the criteria for increasing efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА	6
1.1 Тенденції розвитку сонячної енергетики в Україні.....	6
1.2 Види фотоелектричних систем	8
1.3 Складові фотоелектричної системи.....	11
1.4 Висновки.....	18
2 МЕТОДИЧНА ЧАСТИНА.....	19
2.1 Методика визначення сонячного енергетичного потенціалу	19
2.2 Методика визначення споживання електричної енергії об'єктом	20
2.3 Методика розробки фотоелектричної системи.....	22
2.4 Методика розрахунку генерації фотоелектричної системи	33
2.5 Висновки.....	35
3 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА.....	36
3.1 Вихідні дані	36
3.2 Визначення сонячного енергетичного потенціалу	37
3.3 Визначення електроспоживання приватного будинку	40
3.4 Розробка фотоелектричної системи	41
3.5 Розрахунок вироблення енергії фотоелектричною системою	49
3.6 Висновки.....	51
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	53
4.1 Теоретико-методологічні основи безпеки праці та класифікація ризиків	53
4.2 Виробничий травматизм і професійні захворювання.....	53
4.3 Виробниче середовище	53
4.4 Пожежна безпека.....	57
4.5 Техніко-економічні розрахунки заходів з охорони праці	58
4.6 Висновки	59
ВИСНОВКИ	61

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	63
ДОДАТОК А Відомості щодо апробації кваліфікаційної роботи	68
ДОДАТОК Б Визначення енергоспоживання об'єкта	70
ДОДАТОК В Параметри компонентів фотоелектричної системи	71

ВСТУП

На сьогодні сонячна енергетика є одними які найрозвинутіші з секторів відновлюваних джерел енергії як в Україні, так і у світі. Цей стрімкий зріст популярності викликаний передумовами, а саме: вичерпністю викопного палива, критичним рівнем викидів CO₂, та потребою у екологічному збереженні планети. До того ж технологічному розвитку сприяє поява нових матеріалів для сонячних елементів.

На даний час інженери та науковці зосереджені на створенні гнучких технічних рішень, вдосконаленні напівпровідникових перетворювачів, а також на розробці більш ефективних програмно-апаратних комплексів для точного моніторингу та керування генерацією [1].

Метою роботи є розробка фотоелектричної системи, призначеної для безперервного енергозабезпечення приватного будинку у с. Нововоронцовка Херсонської області.

Для досягнення мети роботи необхідно вирішити наступні завдання:

- визначити надходження сонячної радіації для кліматичних умов місцезнаходження приватного будинку;
- розрахувати електроспоживання об'єкту;
- провести розробку фотоелектричної системи для енергозабезпечення приватного будинку;
- визначити генерацію електроенергії системою;
- розглянути питання охорони праці.

Об'єктом дослідження є приватний будинок у с. Нововоронцовка Херсонської області.

Предмет дослідження: фотоелектрична система енергозабезпечення.

Методи досліджень: розрахунковий метод, аналіз отриманих результатів.

В даній роботі проведено розробку фотоелектричної системи з акумулюванням для приватного будинку, розташованого у с. Нововоронцовка

Херсонської області.

У роботі проведено аналіз літературних джерел, визначено обсяги енергоспоживання об'єкта та надходження сонячної радіації. Підібрано необхідне обладнання, розглянуто схеми підключення компонентів і визначено оптимальні системи автоматики. Також розраховано генерацію енергії фотоелектричною системою. Крім того, приділено увагу питанням охорони праці.

Тези доповіді «Моделювання роботи літій-залізо-фосфатних акумуляторних батарей» авторів Хайнус М.В., к.т.н., доц. Андронova О.В. опубліковано в матеріалах X Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Актуальні проблеми сучасної енергетики». – Херсон: Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2026. – С. 38-39 (Додаток А).

1 ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА

1.1 Тенденції розвитку сонячної енергетики в Україні

Сонячна енергетика є основними представниками відновлюваної енергетики. Однак основною проблемою її використання є мінливість вироблення енергії і необхідність наявності супутніх маневрових потужностей.

Сонячна енергетика в Україні тільки починає розвиток, проте має великий потенціал. Щорічний обсяг сонячної енергії в Україні вищий, ніж у Німеччині, яка є лідером в цій галузі. З 2018 по 2020 роки потужності сонячної енергії в Україні зросли майже в п'ять разів. Наразі в країні діє близько 1400 об'єктів сонячної генерації різної потужності [2].

У 2020 році завдяки сонячній енергосистемі було вироблено близько 6320 МВт. Протягом 2020 року було встановлено понад 286 МВт.

Сукупна встановлена потужність сонячних електростанцій (ФЕС) в Україні станом на кінець 2021 року досягла 6400 МВт. Протягом 2021 року було встановлено понад 700 МВт нових потужностей відновлюваних джерел енергії, де значну частку склали саме сонячні електростанції [3].

З початку повномасштабного вторгнення 24 лютого 2022 року українська енергетична інфраструктура перебуває під системними атаками. Сонячна енергетика також зазнала значних втрат: 14% промислових сонячних електростанцій були пошкоджені або зруйновані, понад 950 МВт сонячних потужностей опинилися на тимчасово окупованих територіях, це щонайменше 62 промислові ФЕС, не враховуючи тисячі домашніх станцій.

Частина цих електростанцій змушена працювати синхронно з російською енергосистемою. На контрольованій урядом території України функціонує приблизно: 5,9 ГВт промислових ФЕС, та близько 1,2 ГВт домашніх сонячних електростанцій [4].

Станом на січень 2023 року в Україні функціонувало приблизно

7700 МВт: 6300 МВт промислових сонячних електростанцій та 1400 МВт домашніх сонячних електростанцій. Протягом року було встановлено близько 500 МВт.

Загальна потужність виробленої сонячної електроенергії на початку 2024 року становить понад 8 ГВт. Цього ж року в Україні побудовано приблизно 800-850 МВт сонячних електростанцій коштом бізнесу і домогосподарств [3].

Інсоляція в Україні варіюється від 1100 до 1500 кВт год/м², що робить всю територію країни придатною для розміщення сонячних електростанцій. Оптимальними для експлуатації є області на півдні країни. Близько половини всіх сонячних електростанцій зосереджені в шести областях: Івано-Франківській, Дніпропетровській, Вінницькій, Хмельницькій та Київській та Миколаївській. Найменше станцій у Луганській та Донецькій, Сумській та Полтавській областях. За два роки війни було зруйновано або пошкоджено близько 13% промислових сонячних електростанцій. І ці потужності необхідно відновити якнайшвидше.

Впровадження розвитку розподіленої генерації до 2035 року та операційний план заходів з її реалізації у 2024 – 2026 роках.

Основною перевагою розподіленої генерації, як зазначається у Стратегії, є будівництво та/або розміщення нових генеруючих потужностей на великій кількості майданчиків, які підключаються до розподільних мереж та є наближеними до споживача. При цьому ураження великої кількості відносно малопотужних електростанцій та установок зберігання енергії є значно складнішим завданням, ніж знищення відносно обмеженої кількості теплових електростанцій та гідроелектростанцій значної потужності, що дасть змогу мінімізувати втрати потужності в об'єднаній енергетичній системі України [5].

1.2 Види фотоелектричних систем

Фотоелектрична система (ФЕС) – електроустановка призначена для виробництва електричної енергії, яка є економічною, екологічною, має короткий строк будівництва та введення в експлуатацію [6]. Водночас фотоелектричні системи мають негарантований графік виробництва електричної енергії, який залежить від рівня сонячної інсоляції, яка має добову та річну періодичність. При цьому середньодобові обсяги виробництва електричної енергії у зимовий період значно зменшуються, приблизно в 6 разів у порівнянні з показниками у період літнього максимуму сонячної інсоляції. Стрімке зростання потужностей фотоелектричні системи без впровадження систем управління попитом та/або установок зберігання енергії призводить до формування профіцитів електричної енергії у денні години весняно-літнього періоду. У зв'язку з цим будівництво нових фотоелектричних систем має здійснюватися одночасно з будівництвом установок зберігання енергії, маневрової генерації та вітрових електростанцій для формування оптимальної структури генеруючих потужностей з метою покриття попиту на електричну енергію протягом року [7].

Мережеві фотоелектричні системи – одні з найпростіших, вони дозволяють використовувати сонячну енергію паралельно з енергією від електромережі. Вони не автономні, тому що у них немає акумуляторів, які могли б зберігати зібрану енергію. Вони не працюють, якщо не працює основна мережа. Такі фотоелектричні системи використовуються, щоб знизити вартість комунальних послуг і по можливості заробити, продаючи надлишки енергії за «зеленим» тарифом. Живлення від електромережі використовується вночі, в погану погоду, при високих витратах електроенергії або при несправності фотоелектричної системи. В інший час всі потреби середньостатистичного будинку покриває сонячна енергія. Така фотоелектрична система складається з: фотоелектричних модулів, мережевого інвертора, електричної мережі, лічильник, який працює не лише на

споживання з електричної мережі, а й на віддачу в мережу, та головним захистом в цій та наступних схемах є щити захисту для постійного струму, який розміщений між фотоелектричними модулями та інвертором та для змінного струму який розміщений між інвертором та електричною мережею (рис. 1.1) [8].

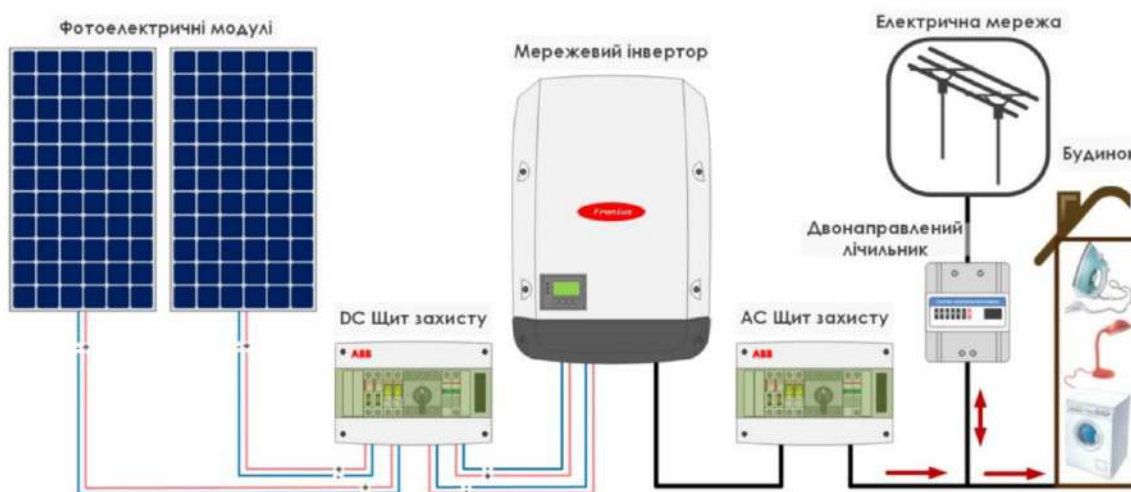


Рисунок 1.1 – Схема мережевої фотоелектричної системи [6]

Автономні фотоелектричні системи використовуються як і з централізованою мережею так і там, де немає централізованих ліній електропередачі, тобто прокладання мереж ускладнено або економічно недоцільно, або для електроживлення автономних об'єктів і пристроїв, а також пересувних об'єктів (рис. 1.2). Автономна сонячна електростанція є простішою ніж гібридна. Зазвичай вона складається з таких елементів як: фотоелектричні модулі, контролер заряду, акумулятор, лічильник, який працює лише на споживання з електричної мережі, інвертор та споживач, в наш час часто використовується інвертор з вбудованим контролером заряду, тому як окремий елемент контролер не використовується.

Гібридні фотоелектричні системи призначені для підвищення надійності електроживлення з комбінацією декількох джерел енергії: централізована мережа, фотоелектричний генератор, як альтернативу можна використовувати вітрогенератори та генератори. Найчастіше використовується для поєднання

фотоелектричних модулів та централізованої мережі (рис. 1.3). Зазвичай гібридні фотоелектричні системи складається з фотоелектричних модулів, акумулятора, гібридного інвертора, вводу від централізованого електропостачання, споживача та лічильника, який працює на споживання з електричної мережі, й на віддачу в мережу. Також такий вид системи може підходити для продажу надлишків електроенергії тобто «зеленого» тарифу [9].

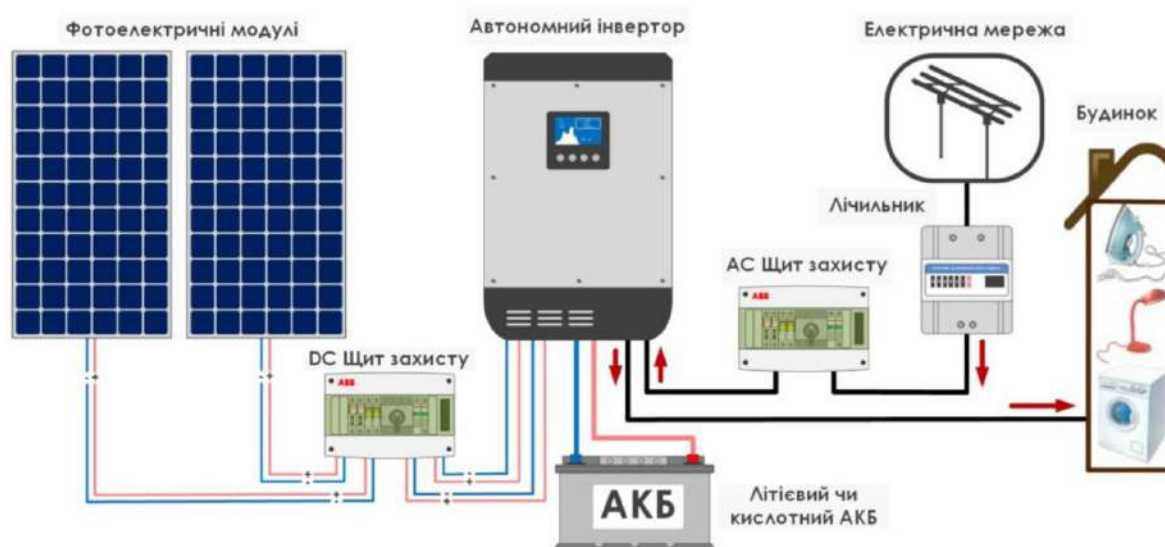


Рисунок 1.2 – Схема автономної фотоелектричної системи [6]

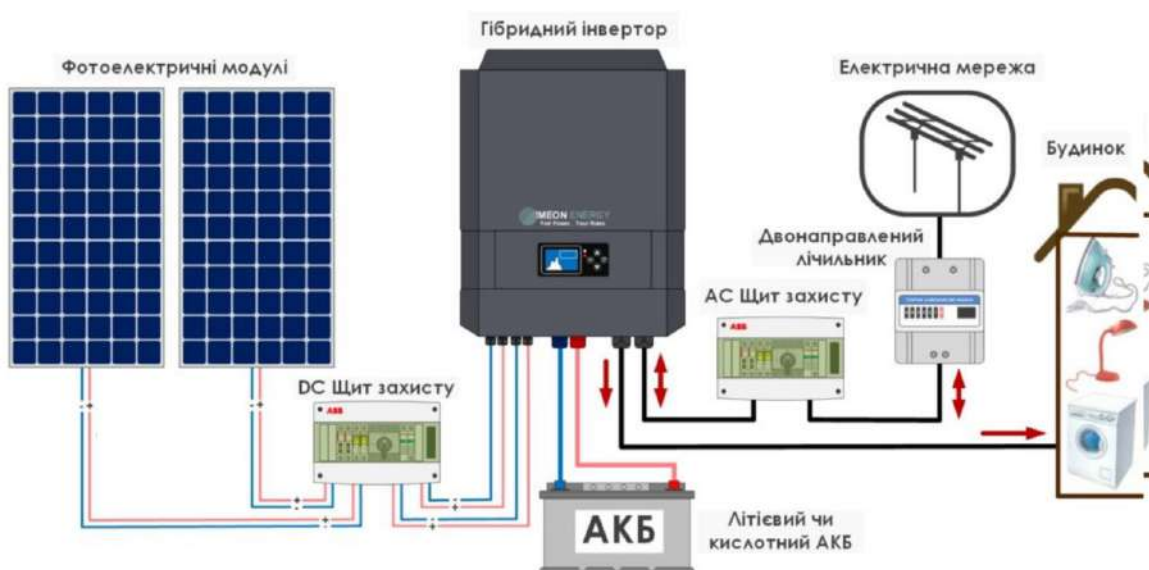


Рисунок 1.3 – Схема гібридної фотоелектричної системи [6]

1.3 Складові фотоелектричної системи

Основні види фотоелектричних модулів: монокристалічні, гнучкі, полікристалічні, кристалічні модулі на основі кремнію можуть бути односторонніми та двосторонніми.

Монокристалічні фотоелектричні модулі передбачають використання кристалічного кремнію (рис. 1.4, а). Серединою модуля є сонячні елементи, які зверху і знизу закриваються плівкою-герметиком. Вона запобігає потраплянню вологого повітря на сонячний елемент, в результаті чого може відбутися окислення і вихід з ладу останнього. Етиленвінілацетатна плівка ЕВА не є кращим рішенням, але застосовується до сих пір, оскільки через деякий час втрачає прозорість. У цьому напрямку ведуться розробки, проте в промислових масштабах дослідники поки нічого не винайшли для покращення технології. Сонячна панель перетворить сонячну енергію в постійний струм, згодом інвертор перетворить його в змінний струм згідно стандарту в 220 В.

Полікристалічні фотоелектричні модулі (рис. 1.4, б). Візуальна відмінність цього виду панелей зернистий візерунок, обумовлений наявністю великої кількості кристалів різної орієнтації. При виробництві панелей з полікристалів використовується кремній середнього очищення і відсутня технологічна стадія витягування кристалів, тому витрати на виготовлення виходять меншими порівняно з монокристалами. Полікристалічні елементи мають квадратну форму з причини прямокутної конфігурації заготовок. Колір їх неоднорідний, що пояснюється сукупністю неоднакових за орієнтацією монокристалічних зерен у складі полікристалічного елемента. Перевагами полікристалічних модулів є менша вартість, а також менші темпи зниження генерації при збільшенні хмарності небозводу у порівнянні з монокристалічними.

Двосторонні фотоелектричні модулі (bifacial solar module) (рис. 1.4, в) мають багато переваг в порівнянні з традиційними сонячними панелями. Такі модулі перетворюють сонячну енергію, що надійшла з тильного та

фронтального сторін модуля. Для цього модулі встановлюються на поверхню з високою відбивальною здатністю наприклад, білий дах з або на землю зі світлою поверхнею. Деякі виробники двосторонніх модулів заявляють, що виробництво збільшується на 30 % за рахунок додаткової потужності, що генерується із тильної сторони. Двосторонні модулі бувають різних конструкцій: рамкового і без рамкового виконання. Деякі з них мають подвійне скло, а інші використовують прозорі задні листи. У більшості використовуються монокристалічні елементи, але є і полікристалічні конструкції. Двосторонні модулі мають контакти/шини як на передній, так і на тильній поверхнях елементів.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.4 – Фотоелектричний модуль:

а) монокристалічний; б) полікристалічний; в) двосторонній; г) гнучкий

Гнучкі фотоелектричні модулі (Flexible Module) (рис. 1.4, г) мають нижчу ефективність у порівнянні з кристалічними кремнієвими фотоелектричними модулями. Виготовляються на основі аморфного кремнію, телуриду кадмію або селеніда міді, індія і галію (CIGS). Модулі можна згинати більше 200 разів на радіус вигину 4 см без зміни ефективності. Максимально досяжна ефективність на сьогодні для CIGS становить 18,4 % [9].

Проведемо порівняння фотоелектричних елементів на основі моно- та полікристалічного кремнію, які на сьогодні є найбільш поширеними на ринку.

До основних плюсів монокристалічних сонячних панелей належить: висока ефективність (ККД); висока стабільність показників; низький температурний коефіцієнт – незначне зниження потужності при нагріванні панелі; низька швидкість старіння (деградації) та низька втрата ефективності; термін служби 30 років і більше; швидка окупність; надійність та довговічність.

Перевагою є більш високе співвідношення потужності до площі поверхні модуля, що дозволяє виробляти монокристалічні пристрої меншого розміру, ніж аналоги, для виробництва однієї і тієї ж кількості електроенергії. До недоліків можна віднести вищу ціну.

Полікристалічні сонячні панелі мають досить хороші характеристики ефективності, стабільності параметрів, температурного коефіцієнта та швидкості деградації. Однак вони більшою чи меншою мірою поступаються монокристалічним аналогам. Наприклад, ефективність у середньому на 5% нижча, ніж у моно панелей. Інші плюси: оптимальне співвідношення ефективності та вартості; менша кількість відходів кремнію під час їх виготовлення; відносно невисока ціна - на 15-20 % нижче, ніж у монокристалічних модулів.

До недоліків можна віднести більш тривалий термін окупності та менший термін експлуатації – у середньому вони служать понад 25 років. Для забезпечення однакової потужності виробляють фотоелектричні модулі більшого розміру, що потребує додаткової корисної площі [10].

Таким чином, монокристалічні фотоелектричні модулі вирізняються найвищою ефективністю фотоелектричного перетворення серед комерційно доступних модулів (більше 22%), завдяки використанню максимально чистого вихідного матеріалу – монокристалічного кремнію. Полікристалічні сонячні батареї є більш доступними за ціною, оскільки використовують менш дорогий вихідний матеріал – мультикристалічні пластини. Проте їхня ефективність трохи нижча 18-20 %. Вони ефективно працюють у випадках, коли не потрібно максимально використовувати потужність з установленної площі панелей [11].

Для створення установок зберігання енергії в складі гібридної та автономної ФЕС використовуються акумуляторні батареї (АКБ) переважно свинцево-кислотної та літій-іонної електрохімічних систем.

АКБ можуть працювати в трьох режимах: у циклічному – коли акумуляторна батарея є основним джерелом живлення, що характерно для автономних ФЕС; у буферному режимі – коли акумулятор постійно підключений до мережі і використовується в якості резервного джерела живлення в моменти аварій в енергосистемі; у змішаному – коли відбувається комбінація параметрів перших двох режимів [12].

В акумуляторних батареях свинцево-кислотного типу електроди виготовлені з діоксиду свинцю та губчастого свинцю, а електроліт – це розчин сірчаної кислоти. Простота конструкції та дешевизна матеріалів конвертуються у низьку ціну готового продукту, в деяких випадках це стає головним аргументом для формування великих, об'ємних накопичувачів енергії. Висока пікова струмовіддача, яка вимірюється сотнями ампер, роблять такі АКБ ідеальними як буферна системи для стабілізації живлення. Технічне обслуговування нескладне, робити його потрібно регулярно, хоча і не для всіх підвидів [13].

Основною проблемою таких акумуляторів є низький пороговий рівень розряду, що не перевищує 50 % від номінальної ємності, тобто з АКБ на 100 А·год можна безпечно отримати ємність близько 50 А·год. Якщо допустити більшу глибину розряду, то швидко втрачається номінальна ємність

батареї. Також така батарея має суттєво меншу кількість гарантованих циклів заряд/розряд, приблизно 500–800, опісля досягнення якого, теж суттєво зменшується ємність. Кілька розрядів, глибших за 50 % також суттєво скорочують термін експлуатації. Процес заряду, та розряду, породжує хімічні реакції, у результаті яких відбувається википання дистильованої води у ланках батареї, її рівень, а також щільність самого електроліту потрібно регулярно контролювати, а це потребує витрат часу, якщо збірка велика, необхідно також мати навички, розуміння техніки безпеки, та інструмент з розхідниками. Навіть правильна та грамотна експлуатація не зможе вберегти батарею від вікової деградації, з часом електроди покриється сульфатом свинцю (сульфатація), та призведе до руйнування самих пластин, як наслідок вихід АКБ з ладу. А ще класичні батареї дуже важкі, та достатньо габаритні. Також такі АКБ мають відносно невелику енергощільність, близько 50 Вт·год/кг.

Підвидами свинцево-кислотних АКБ є AGM, Gel та OPzS акумулятори.

AGM розшифровується як Absorbent Glass Mat або Абсорбуючий скляний мат. Не протікають, електроліт абсорбований у маті зі скловолокна. Переваги акумуляторів з технологією AGM, це збільшений ККД у порівнянні з класичними свинцево-кислотними. Глибина безпечного розряду збільшено до 70 % від ємності батареї. Також такий акумулятор герметичний, не википає, не потребує обслуговування, та може бути розміщеним у будь-якому просторовому положенні. Кількість циклів збільшено до 1200. Типова модель здатна витримувати до 200 циклів розряду з глибиною 100 %, до 350 – з глибиною 50 % і до 800 – з глибиною 30 %. Застосовувати AGM акумулятори доцільно в системах резервної живлення, тобто у буферному режимі.

До недоліків AGM акумуляторів можна віднести вищу на 30-40 % ціну. Також, такі акумулятори вибагливі до температурного режиму, ідеальним показником є +25°C, верхньою межею є +45°C, після чого батарея почне прискорено старіти. Важливим є процес зарядки та його контролю, адже недозаряд та перезаряд можуть сильно зменшити ресурс батареї. Такі АКБ мають відносно невелику енергоемність, близько 50 Вт·год/кг [13].

Gel (Gelled Electrolite (гелеподібний електроліт) або їх ще називають гелевими. Електроліт не витікає, бо згущений до стану гелю. Зазвичай такі види використовують в ФЕС. У гелевих акумуляторах в якості сепаратора між свинцевими пластинами застосовується силікагель яким заливається простір між пластинами в процесі виробництва. Силікагель після застигання являє собою тверду речовину з величезною кількістю пор, в яких утримується електроліт. Завдяки тому, що силікагель повністю займає простір між пластинами, в гелієвих акумуляторних батареях практично неможливе осипання свинцевих пластин і як наслідок, замикання та вихід з ладу. Крім того, така конструкція дозволила поліпшити якісні характеристики гелієвих акумуляторів, а саме, число циклів розряду і стійкість до глибоких (100%) розрядів. І якщо їх номінальний термін експлуатації не відрізняється від терміну служби акумуляторних батарей технології AGM і тут також існують моделі з 5-ти і 10-ти річним терміном, то кількість циклів типової гелієвої батареї в середньому на 50 % вище. Типова модель технології GEL здатна витримувати до 350 циклів розряду з глибиною 100 %, до 550 – з глибиною 50 % і до 1200 – з глибиною 30 %. Найбільшим з його недоліків це енергощільність, яка є навіть меншою ніж в AGM та звичайних свинцево-кислотних та становить 45 Вт·год/кг [13].

Свинцево-кислотні акумулятори, що створені для роботи в складі ФЕС - акумулятори OPzS (Ortsfest Panzerplatte Säure – стаціонарний, трубчаста пластина, рідкий сірчано-кислотний електроліт). Вони мають одну важливу конструктивну особливість, що отримує перевагу перед іншими типами АКБ – це трубчасті позитивні і решітчасті намазні негативні пластини. Окремі елементи які мають напругу 2 В зроблені у вигляді прозорих пластикових корпусах з стирол-акрилнітрил (SAN), матеріалу, який надстійкий до хімічних і механічних пошкоджень, який не піддається горінню. Спрощує їх обслуговування те, що вони мають прозорі корпуси, рівень електроліту чітко видно, максимальний і мінімальний рівні промарковані. Термін служби акумуляторів типу OPzS є найвищим серед усіх свинцево-кислотних

технологій і залежить від режиму роботи. Буферний режим 15–20 років (за оптимальної температури 20°C). Циклічний режим: при глибині розряду 80% термін служби становить 1200–1500 циклів; при глибині розряду 50 % – близько 2000–2500 циклів; при глибині розряду 30 % – понад 3000–4000 циклів. Але недоліком є їхня енергоємність яка становить 35 Вт·год/кг [14].

Серед групи літій-іонних АКБ для ФЕС застосовуються літій-залізо-фосфатні, Lithium Iron Phosphate або скорочено LiFePO₄. Ці батареї мають ще більшу вартість. Проте, головним їхнім плюсом є стійкість до температурних коливань. Крім того, вони мають високу стабільність та безпечність у використанні.

Високий рівень ККД, такий акумулятор може безпечно віддавати 95 % своєї ємності, при тому, що вольт-амперна характеристика 80 % часу буде у сталому діапазоні, без значних коливань. Такі акумулятори працюють у діапазоні від -20 °C і до +60 °C, краще реагують на перегрів, що було слабким місцем звичайних літєвих та гелевих акумуляторів. Енергоємність таких акумуляторів не найбільша, і становить 90-160 Вт·год/кг. Також кількість циклів тут коливається у діапазоні 3000-6000. Дуже низький рівень саморозряду та вікової деградації, умовно, термін служби такого АКБ при нормальній експлуатації може сягати 10–15 років. Висока струмовіддача до 2-3С, без зменшення ресурсу та значного нагріву. Також, кожен готовий АКБ має свою власну плату BMS, яка регулює заряд, розряд, баланс внутрішніх елементів, температуру та безпеку. За необхідності зі збірки накопичувача енергії, можна у будь – який момент вийняти окремий АКБ, та замінити на інший, зі схожими характеристиками.

Батареї на основі LiFePO₄ стали значно безпечнішими у плані пожежі, та самозаймання у порівняння зі звичайними Li-Ion, але все ж рівень небезпеки, та складність гасіння тут вища ніж у свинцево-кислотних батарей. Також і акумуляторів LiFePO₄ суттєво знижується ємність при низьких температурах, особливо нижче 0 °C. Головним недоліком акумуляторів LiFePO₄ в порівнянні з свинцево-кислотними є їх ціна, яка більша у 5-6 разів.

У підсумку можна сказати, що акумулятори LiFePO_4 – це нова епоха у технології збереження електричного заряду, та дуже достойний аналог свинцево-кислотних акумуляторів у системах накопичення заряду, що практично вирішив всі слабкі сторони останніх [15].

1.4 Висновки

Розвиток сонячної енергетики в Україні на сьогодні – це не просто питання екології, а критична необхідність. В умовах системних атак на енергетичну інфраструктуру та втрати значної частини генеруючих потужностей, саме фотоелектричної системи у форматі розподіленої генерації здатні підвищити стійкість енергосистеми України.

Вибір обладнання має базуватися на конкретних умовах експлуатації та місці монтажу. Аналіз фотоелектричних модулів показує, що монокристалічні панелі залишаються лідерами за ефективністю (рекордний ККД понад 24 %) , хоча полікристалічні можуть бути доцільними як більш бюджетний варіант.

Найслабшою ланкою будь-якої автономної чи гібридної станції є накопичення енергії, без якого неможливо збалансувати систему. Класичні свинцево-кислотні акумулятори, включаючи вдосконалені технології AGM та GEL, приваблюють меншою ціною, але мають низьку енергоємність (в середньому 35–50 Вт·год/кг) і швидко деградують при глибоких розрядах. Для довгострокової та надійної роботи найкращим рішенням виступають акумулятори технології LiFePO_4 . Для специфічних стаціонарних завдань з рідким циклуванням як альтернативу можна розглядати довговічні заливні батареї OPzS.

Загалом, поєднання вискоефективних фотомодулів та надійних літієвих накопичувачів дозволить створювати ФЕС, які не лише окупляться, але й забезпечать реальну енергонезалежність у сучасних складних реаліях.

2 МЕТОДИЧНА ЧАСТИНА

2.1 Методика визначення сонячного енергетичного потенціалу

Для проектування сонячних систем необхідне використання середньомісячного добового випромінювання на похилій поверхні.

Випромінювання на похилу поверхню складається з трьох компонентів: прямої радіації, ізотропної дифузної, що надходить з небозводу, і сумарної сонячної радіації, розсіяно-відбитої від землі, дані щодо яких наводяться в кліматичних базах, наприклад, НАСА [16].

Нахилена поверхня з кутом нахилу β "бачить" частину небозводу у ракурсі $\frac{[1+\cos(\beta)]}{2}$. Наведене співвідношення є поправочним коефіцієнтом для урахування дифузної радіації, що надходить з неба, $R_d = \frac{[1+\cos(\beta)]}{2}$.

Нахилена поверхня перетворювача крім поверхні землі охоплює також інші навколишні предмети та поверхні, від яких надходить дифузно-відбита сонячна радіація. Якщо коефіцієнт відбиття цих поверхонь за відношенням до сонячного випромінювання становить ρ , то відбите від навколишніх об'єктів випромінювання надходить на поверхню перетворювача як частина сумарної сонячної радіації з поправочним коефіцієнтом $R_d' = \rho \cdot \frac{[1-\cos(\beta)]}{2}$.

Сумарний потік середньомісячної добової сонячної радіації, який надходить на нахилену поверхню, $\bar{H}_{dh}$, з урахуванням всіх трьох складових становить, кВт·год / (м²·добу) [17]:

$$\bar{H}_C = \bar{H}_{bh} \cdot \bar{R}_b + \bar{H}_{dh} \cdot \frac{[1 + \cos(\beta)]}{2} + \bar{H}_{th} \cdot \rho \cdot \frac{[1 - \cos(\beta)]}{2}, \quad (2.1)$$

де $\bar{H}_{bh}$, $\bar{H}_{dh}$ – середньомісячна добова дифузна та пряма інсоляція горизонтальної поверхні, кВт·год/(м²·добу);

$\bar{H}_{th} = \bar{H}_{bh} + \bar{H}_{dh}$ – сумарна горизонтальна інсоляція, кВт·год/(м²·добу);

ρ – альбедо земної поверхні може приймати такі значення: $\rho=0,2$ – за

відсутності снігу та $\rho=0,7$ – за наявності снігового покриву;

$\bar{R}_b = \bar{H}_{bc}/\bar{H}_{bh}$ – коефіцієнт перерахунку прямої радіації з горизонтальної поверхні на похилу для заданого місяця.

Для орієнтованих на екватор поверхонь у Північній півкулі азимутальний кут $a_n = 0^\circ$:

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega'_s + (\frac{\pi}{180}) \cdot \omega'_s \cdot \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin\delta}{\cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s + (\frac{\pi}{180}) \cdot \omega_s \cdot \sin\varphi \cdot \sin\delta}, \quad (2.2)$$

де φ – географічна широта, град.;

δ – схилення Сонця для середнього дня в місяці, град.;

$\omega'_s = \cos^{-1}(-\tan\varphi \cdot \tan\delta)$ – часовий кут заходу сонця на горизонтальній поверхні, град.;

ω'_s – часовий кут заходу сонця на поверхні приймача, визначений для середнього дня місяця, який визначається за формулою:

$$\omega'_s = \min \left[\cos^{-1}(-\tan\varphi \cdot \tan\delta) \right], \quad (2.3)$$

де "min" означає менше значення з двох розрахованих значень в дужках, а $\cos^{-1} = \arccos$.

2.2 Методика визначення споживання електричної енергії об'єктом

Для визначення споживання електричної енергії об'єктом необхідно перерахувати все навантаження змінного струму, при цьому використовуються дані щодо номінальної потужності споживачів та режимів їх використання. Добове споживання активної електроенергії змінного струму визначається як сума добутків номінальної потужності електроприймачів (табл. Б.1) та тривалості їхньої роботи. Енерговитрати на освітлення

розраховуються аналогічно на основі сумарної потужності освітлювальних приладів. Характерні графіки навантаження наведено на рис. 2.1.

Для визначення еквівалентної потреби в енергії постійного струму з урахуванням втрат в інверторі необхідно отримати добуток: значення потужності на коефіцієнт $k = 1,2$ [18]:

$$P_{\text{спож}} = P_{\text{змін}} \cdot k. \quad (2.4)$$

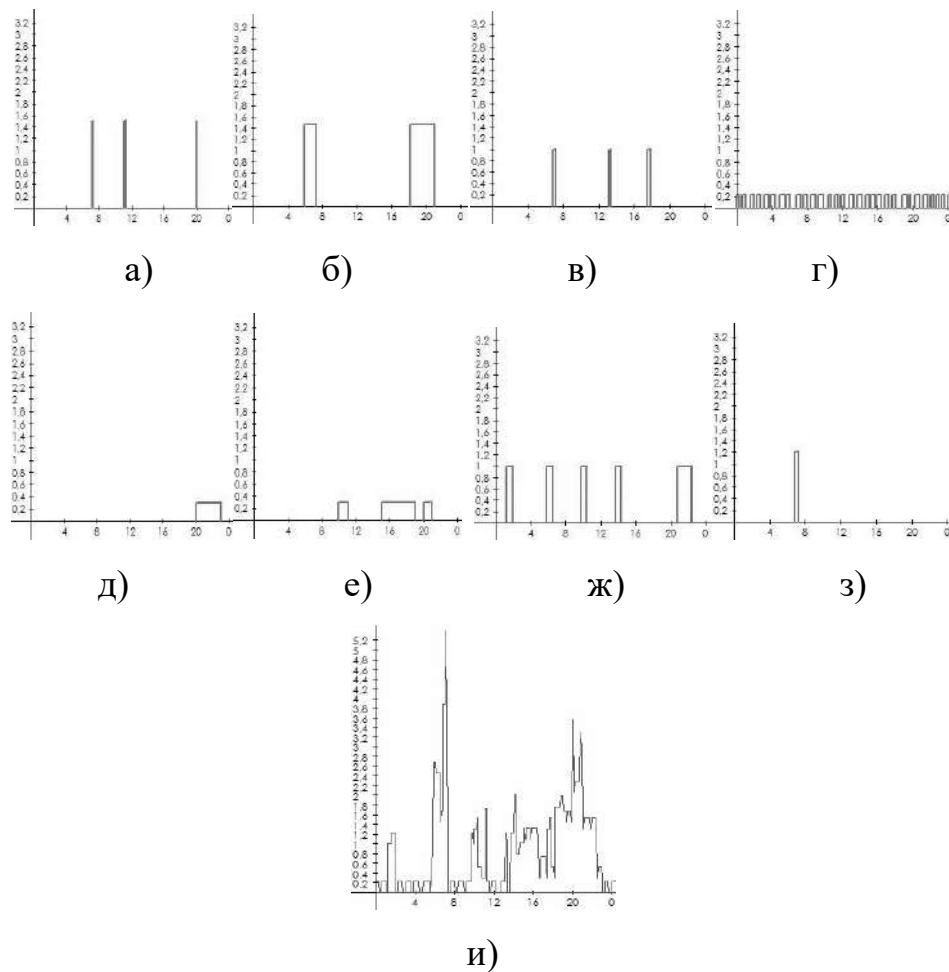


Рисунок 2.1 – Графіки навантаження:

- а) чайник; б) освітлення; в) мікрохвильова піч; г) холодильник;
 д) телевізор; е) персональний комп'ютер; ж) кондиціонер;
 з) фен; и) сумарне навантаження

2.3 Методика розробки фотоелектричної системи

Проектування ФЕС починається з оцінки всіх поточних та майбутніх навантажень. Тут важливий баланс, якщо недооцінити споживання, система не впорається з навантаженням, а якщо переоцінити то зростуть матеріальні витрати. Щоб визначити середньодобове споживання енергії, складають профілі навантажень для змінного та постійного струму. Якщо споживання нестабільне і змінюється по сезонах, розрахунок виконують окремо для кожного місяця.

Ємність накопичувача енергії, необхідна для покриття тижневого навантаження споживачів змінного струму AC_{C-l}^C , А·год/тижд., враховує коефіцієнти втрат в акумуляторній батареї, контролері, інверторі та кабельних мережах, і визначається за формулою:

$$AC_{C-l}^C = \frac{\left(\frac{AC}{\eta_{bat} \cdot 10^{-2} \cdot \eta_{inv} \cdot 10^{-2} \cdot \eta_{cont} \cdot 10^{-2} \cdot (100 - l_{wr}) \cdot 10^{-2}} \right)}{U_s}, \quad (2.5)$$

де AC – кількість електричної енергії, що споживається за тиждень навантаженням змінного струму, Вт·год/тижд.;

η_{bat} – ККД заряду акумуляторної батареї, %;

η_{inv} – ККД інвертора, %;

η_{cont} – ККД контролера заряду, %;

l_{wr} – електрична енергія, яка втрачається в електропроводці, %.

U_s – номінальне значення напруги системи, В.

Ємність накопичувача енергії, необхідна для покриття тижневого навантаження споживачів постійного струму DC_{C-l}^C , А·год/тижд., враховує втрати у DC/DC-перетворювачі та провідниках кабельної мережі, і визначається за формулою:

$$DC_{C-l}^C = \frac{\left(\frac{DC}{\frac{\eta_{DC}}{DC} \cdot 10^{-2} \cdot (100 - l_{wr}) \cdot 10^{-2}} \right)}{U_{DC}}, \quad (2.6)$$

де DC – електрична енергія, що споживається за тиждень навантаженням постійного струму, Вт·год/тижд.;

$\frac{\eta_{DC}}{DC}$ – ККД DC-DC перетворювача напруги, %;

U_{DC} – напруга споживання DC-навантаженням, В.

Загальна ємність накопичувача для покриття добового навантаження споживачів змінного та постійного струму $(AC + DC)_{C-l}^C$, А·год/добу, визначається:

$$(AC + DC)_{C-l}^C = \frac{\sum_{i=m}^n AC_{C-l}^C + \sum_{i=m}^n DC_{C-l}^C}{7}. \quad (2.7)$$

Необхідна ємність батареї для забезпечення автономного живлення ФЕС за відсутності сонячного випромінювання. $(AC + DC)_S$, А·год, розраховується за формулою:

$$(AC + DC)_S = (AC + DC)_{C-l}^C \cdot n_d, \quad (2.8)$$

де n_d – час роботи фотоелектричної системи в автономному режимі, діб.

Час роботи фотоелектричної системи в автономному режимі можна визначати за табл. 2.1. на підставі даних щодо добового надходження сонячної радіації, кВт·год./м² добу.

Таблиця 2.1 – Час автономної роботи, діб.

Надходження сонячної радіації, кВт·год/м ² добу.	>4,5	4,5-3,5	3,5-2,7	2,7-2,0	<2,0
n_d , діб	3-5	6	7	8	15

Номінальна ємність акумуляторної батареї C_{bat} , А·год, обчислюється за формулою:

$$C_{bat} = \frac{(AC + DC)_S \cdot k_{temp} \cdot k_{mar} \cdot k_{adg} \cdot k_k \cdot k_i}{k_{DOD}}, \quad (2.9)$$

де k_{temp} – температурний коефіцієнт ємності акумуляторної батареї;

k_{mar} – коефіцієнт експлуатаційного резерву потужності, типові значення від 1,1 до 1,15;

k_{adg} – деградаційний коефіцієнт старіння АКБ (для свинцево-кислотних акумуляторів 1,25; для циклічних глибоких розрядів або підвищених температур 1,44; при обмеженій глибині розряду 1,1) [19];

k_k – коефіцієнт розрядної характеристики (залежить від струму розряду, кінцевої напруги розряду);

k_i – коефіцієнт, що характеризує відношення початкового заряду нової АКБ до її номінального заряду; якщо $k_{adg} \geq 1,25$, то $k_i = 1$; якщо $k_{mar} > 1,1$, а заряд акумуляторної батареї становить 90% від номінального, то $k_i = 1$;

k_{DOD} – коефіцієнт допустимої глибини розряду, в залежності від виду електрохімічних систем приймається в діапазоні від 0,2 до 0,8, для свинцево-кислотних акумуляторів не перевищує 0,5 [19].

Для визначення параметрів автономного інвертора, його номінальної потужності P_{nom}^{inv} , використовують наступну формулу:

$$P_{nom}^{inv} = \sum P_{AC}^{30min}, \quad (2.10)$$

де P_{AC}^{30min} – сума значень навантажень змінного струму одночасно включених з ймовірністю не менше ніж 30 хв., Вт.

Максимальна потужність автономного інвертора P_{max}^{inv} , Вт, визначається

сумарною потужністю всіх одночасно включених навантажень для п'ятихвилинного інтервалу P_{AC}^{5min} :

$$P_{max}^{inv} = \sum P_{AC}^{5min} \cdot k_s, \quad (2.11)$$

де k_s – коефіцієнт запасу, який враховує можливе збільшення навантаження в майбутньому, типове значення від 1,1 до 1,25.

Даний розрахунок також можна застосувати до гібридного інвертора, оскільки він працює в автономному режимі

Щоб правильно скомпонувати гібридну сонячну станцію, кількість, схему включення і сумарну потужність модулів підбирають в залежності від параметрів фотоелектричних модулів та параметрів інвертора. Розрахунок кількості послідовно з'єднаних модулів в одному стрингу n_{str}^{mod} виконують за наступною формулою:

$$n_{str}^{min,mod} \leq n_{str}^{mod} \leq n_{str}^{max,mod}, \quad (2.12)$$

де $n_{str}^{min,mod}$ – найменше число фотоелектричних модулів, яке необхідно зібрати в один стринг, од;

$n_{str}^{max,mod}$ – максимальне число фотоелектричних модулів, яке можна зібрати в один стринг, од;

Найменше число послідовно з'єднаних фотоелектричних модулів $n_{str}^{min,mod}$ розраховується за наступною формулою [20, 21]:

$$n_{str}^{min,mod} \leq \frac{U_{min_mpp,in}^{inv}}{U_{min_mpp}^{mod}}, \quad (2.13)$$

де $U_{min_mpp,in}^{inv}$ – напруга включення MPP трекера інвертора, В;

$U_{\min}^{mod}{}_{mpp}$ – мінімальне значення напруги модуля, який працює в точці максимальної потужності; таке значення досягається при розігріві модуля і визначається з наступного виразу:

$$U_{\min}^{mod}{}_{mpp} = \begin{cases} U_{mpp}^{mod} \left[1 + \frac{\gamma_U}{100} (T_{max} - 25) \right], \\ U_{mpp}^{mod} + \gamma'_U (T_{max} - 25) \end{cases}, \quad (2.14)$$

де U_{mpp}^{mod} – напруга фотоелектричного модуля, при якій досягається максимальна потужність, визначена для умов STC виробником, В;

T_{max} – температура розігріву модуля, що для кліматичних умов України досягає 70 °С [21];

γ_U – коефіцієнт залежності напруги холостого ходу модуля від температури, вказується виробником фотоелектричного модуля, %/°С;

γ'_U – коефіцієнт залежності напруги від температури, В/°С.

Найбільша кількість фотоелектричних модулів $n_{str}^{max,mod}$, яку можна безпечно з'єднати в один послідовний ланцюжок без загрози перевищення максимальної напруги входу інвертора $U_{max,in}^{inv}$ розраховується за формулою:

$$n_{str}^{max,mod} \leq \frac{U_{max,in}^{inv}}{U_{oc}^{mod}}, \quad (2.15)$$

де U_{oc}^{mod} – максимально досяжне при експлуатації модуля значення напруги холостого ходу, В:

$$U_{oc}^{mod} = \begin{cases} U_{oc}^{mod} \left[1 + \frac{\gamma_U}{100} (T_{min} - 25) \right], \\ U_{oc}^{mod} + \gamma'_U (T_{min} - 25) \end{cases}, \quad (2.16)$$

де U_{oc}^{mod} – напруга холостого ходу модуля для умов STC, В;

T_{min} – мінімально можлива температура оточуючого середовища, для

України становить - 25 °C.

Найменша робоча напруга стрингу модулів U_{str}^{min} :

$$U_{str}^{min} = n_{str}^{mod} \cdot U_{min}^{mod} . \quad (2.17)$$

Найбільша напруга, яку згенерує весь ланцюжок фотоелектричних модулів при низькій температурі навколишнього середовища U_{str}^{max} , розраховується за формулою:

$$U_{str}^{max} = n_{str}^{mod} U_{max}^{mod} . \quad (2.18)$$

Діапазон напруги стрингу фотоелектричних модулів, розрахований за формулами (2.17)-(2.18), повинен бути в межах діапазону напруги, визначеного виробником інвертора для входу постійного струму з боку підключення масиву модулів. Щоб набрати необхідну загальну потужність масиву фотоелектричних модулів, треба визначити кількість паралельно включених стрингів (n_{str}) за такою умовою:

$$n_{str}^{min} \leq n_{str} \leq n_{str}^{max} , \quad (2.19)$$

де n_{str}^{min} – найменша кількість паралельних ланцюжків, яку необхідно підключити, щоб забезпечити базову робочу потужність для інвертора, од;
 n_{str}^{max} – максимальна кількість паралельних ланцюжків, яку необхідно підключити, щоб забезпечити базову робочу потужність для інвертора, од;

Найменша кількість паралельних ланцюжків n_{str}^{min} яку потрібно підключити для досягнення мінімальної потужності фотоелектричної системи, розраховується за формулою:

$$n_{str}^{min} = \frac{N_m}{n_{str}^{mod}}, \quad (2.20)$$

де N_m – кількість фотоелектричних модулів:

$$N_m = \frac{W_{зм}}{\frac{W_m}{\eta_{inv}}}, \quad (2.21)$$

де W_m – значення енергії постійного струму, який виробляє один фотоелектричний модуль, кВт·год;

η_{inv} – ефективність інвертора [22].

Найбільша кількість паралельних ланцюжків, яку можна підключити до одного МРР трекара, щоб не перевищити гранично допустимий вхідний струм інвертора $I_{max,in}^{inv}$, розраховується за формулою:

$$n_{str}^{max} = \frac{I_{max,in}^{inv}}{I_{max,sc}^{mod}}, \quad (2.22)$$

де $I_{max,sc}^{mod}$ – максимальний вихідний струм фотоелектричного модуля визначається за формулою:.

$$I_{max,sc}^{mod} = \begin{cases} I_{sc}^{mod} \left[1 + \frac{\gamma_I}{100} (T_{max} - 25) \right], \\ I_{sc}^{mod} + \gamma'_I (T_{max} - 25) \end{cases}, \quad (2.23)$$

де I_{sc}^{mod} – струм короткого замикання модуля для умов STC, А

γ_I – температурний коефіцієнт струму короткого замикання фотоелектричного модуля за специфікацією виробника, %/°C;

γ'_I – температурний коефіцієнт струму фотоелектричного модуля за специфікацією виробника, А/°C.

Загальна кількість фотоелектричних модулів, яку потрібно змонтувати

для отримання розрахункової потужності системи, розраховується за формулою:

$$n_{array} = n_{str}^{mod} n_{str}. \quad (2.24)$$

Номінальна потужність масиву фотоелектричних модулів P_{array} (Вт):

$$P_{array} = n_{array} P_m, \quad (2.25)$$

де P_m – номінальна потужність модуля, визначена зі специфікації, Вт.

Ефективність інвертора підвищується при зростанні навантаження, тобто для високих значень ККД інвертора необхідно, щоб потужність масиву модулів не відрізнялася від номінальної потужності інвертора не більше, ніж на 20%, тобто лежала в діапазоні від 80% до 120% від номінальної потужності інвертора. Проведемо перевірку кількості модулів в масиві для визначеного діапазону потужностей:

$$P_{ac,r} \cdot \frac{0,8}{P_m} \leq n_{array} \leq P_{ac,r} \cdot \frac{1,2}{P_m}, \quad (2.26)$$

де $P_{ac,r}$ – номінальна потужність інвертора.

Отримані граничні значення апроксимуються до найближчих цілих чисел: нижня межа – у бік збільшення верхня – у бік зменшення

Площа масиву фотоелектричних модулів розраховується за формулою:

$$S_{array} = abn_{array}, \quad (2.27)$$

де a, b – відповідно ширина та довжина фотоелектричного модуля, м.

Розрахунок схеми підключення АКБ до інвертора. Створення блоку акумуляторних батарей потребує аналізу напруги та струму зарядно-розрядного пристрою, вбудованого в інвертор, та напруги і струмів розряду та

заряду акумуляторів. Для збільшення напруги акумулятори з'єднуються послідовно. Кількість послідовно з'єднаних акумуляторів $N_{\text{посл}}$ у цьому випадку визначається через відношення напруги заряду, що забезпечується зарядно-розрядним пристроєм, $U_{\text{зп}}$ до кінцевої напруги заряду в циклічному режимі одного акумулятора $U_{\text{акц}}$:

$$N_{\text{посл}} = \frac{U_{\text{зп}}}{U_{\text{акц}}}. \quad (2.28)$$

Щоб набрати необхідну ємність акумуляторного блоку, кілька окремих батарей з'єднують паралельно. Скільки саме таких паралельних гілок знадобиться, напряму залежить від струму зарядного пристрою та допустимого струму заряду для однієї батареї, і розраховується за формулою:

$$N_{\text{пар}} = \frac{I_{\text{зп}}}{I_{\text{акц}}}, \quad (2.29)$$

де $N_{\text{пар}}$ – число паралельно з'єднаних груп акумуляторів у складі накопичувача енергії, од.;

$I_{\text{зп}}$ – величина вихідного струму зарядного пристрою, А.;

$I_{\text{акц}}$ – величина зарядного струму одиничного акумулятора, А.

Сумарна кількість акумуляторів у блоці акумуляторних батарей розраховується як добуток числа послідовно та паралельно з'єднаних акумуляторів за виразом:

$$N_{\text{заг}} = N_{\text{посл}} \cdot N_{\text{пар}}, \quad (2.30)$$

де $N_{\text{заг}}$ – кількість акумуляторів у складі блоку АКБ, од.;

$N_{\text{посл}}$ – кількість акумуляторних батарей, послідовно з'єднаних у групу, од.;

$N_{\text{пар}}$ – кількість паралельних гілок АКБ у блоці, од.

Номинальна ємність блоку акумуляторних батарей визначається кількістю паралельно з'єднаних груп акумуляторів і розраховується як добуток ємності однієї групи послідовно з'єднаних акумуляторів на число паралельно інтегрованих груп:

$$C_{\text{вст}} = C_{\text{ак}} \cdot N_{\text{пар}}, \quad (2.31)$$

де $C_{\text{вст}}$ – встановлена ємність акумуляторного масиву, А·год.;

$C_{\text{ак}}$ – номінальна ємність групи послідовно з'єднаних акумуляторів, А·год.;

$N_{\text{пар}}$ – число паралельно з'єднаних гілок акумуляторів у складі накопичувача, од.

Корисна ємність системи накопичення обмежена гранично допустимою глибиною її розряду. Для свинцево-кислотних акумуляторів коефіцієнт експлуатаційного розряду не повинен перевищувати 0,5 від їхньої номінальної ємності, що виражається співвідношенням:

$$C_{\text{дос}} = 0,5 \cdot C_{\text{вст}}. \quad (2.32)$$

Для літій-іонних акумуляторів величина корисної ємності досягає близько 80% від їхнього номінального значення:

$$C_{\text{дос}} = 0,8 \cdot C_{\text{вст}}, \quad (2.33)$$

де $C_{\text{дос}}$ – доступна (корисна) ємність акумуляторного масиву з урахуванням обмеження глибини розряду, А·год.;

$C_{\text{вст}}$ – номінальна ємність акумуляторного блоку.

Енергоемність акумуляторного масиву визначається як добуток номінальної напруги акумулятора, його ємності та числа послідовно інтегрованих одиниць. Цей критерій є інтегральною оцінкою загального обсягу накопиченої енергії системи:

$$E = U_{\text{ном}} \cdot C_{\text{вст}} \cdot N_{\text{посл}}, \quad (2.34)$$

де E – сумарна енергоємність акумуляторного масиву, Вт·год;

$U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга АКБ, В;

$N_{\text{посл}}$ – число послідовно інтегрованих акумуляторів у гілці, од.;

$C_{\text{вст}}$ – загальна ємність акумуляторної батареї, А·год.

Автоматичні вимикачі обираються за напругою, робочим струмом, струмом короткого замикання та кількістю полюсів. Кількість полюсів залежить від фазності: для однофазних (побутових) мереж беруть 1 чи 2-полюсні автомати, для трифазних 3 чи 4-полюсні.

Номінальна напруга автоматичного вимикача визначає його розрахунковий експлуатаційний потенціал. За будь-яких умов встановлення напруга автоматичного вимикача повинна бути більшою або дорівнювати номінальній напрузі мережі $U_{\text{м}}$:

$$U_{\text{AB}} \geq U_{\text{м}}. \quad (2.35)$$

Критерієм вибору комутаційного апарата за максимальним тривалим струмом є аналогічна умова щодо його номінального струму (струму розчіплювача) $I_{\text{ABном}}$ відносно розрахункового струму I_{max} навантаження захищуваної ділянки мережі:

$$I_{\text{ABном}} \geq I_{\text{max}}. \quad (2.36)$$

Розрахунок максимального робочого струму ділянки побутової електромережі передбачає визначення сумарної встановленої потужності шляхом адитивного додавання потужностей усіх споживачів. Подальше обчислення струмового навантаження здійснюється або методом наближеного зіставлення тобто 5 А/кВт для 230 В та 3 А/кВт для 400 В, або за допомогою аналітичного виразу:

$$I = \frac{P}{U_M \cdot \cos \phi}, \quad (2.37)$$

де $\cos \phi = 1$ таке значення приймається для побутових електроприладів.

Критерієм вибору комутаційного апарата за граничною вимикаючою здатністю є перевищення його номінальної відключаючої спроможності над розрахунковим значенням струму короткого замикання в місці встановлення:

$$I_{\text{н.відк}} \geq I_{\text{кз}}. \quad (2.38)$$

Номінальна гранична вимикаюча здатність визначає максимальне значення струму короткого замикання, яке комутаційний апарат спроможний ізолювати за номінальної напруги. Параметричний ряд номінальних струмів теплових розчіплювачів регламентується шкалою: 4, 6, 10, 16, 25, 32, 40, 63, 100, 160 А. У житловому будівництві як ввідні захисні пристрої стандартно застосовують двополюсні автоматичні вимикачі на 16 А або 25 А та граничною стійкістю до струмів короткого замикання на рівні 3 кА [21].

2.4 Методика розрахунку генерації фотоелектричної системи

Щоб дізнатися, скільки саме кіловат-годин електроенергії згенерує фотоелектричний модуль із певною паспортною потужністю за час надходження сонячної радіації використовують формулу, яка враховує сумарну інсоляцію за час опромінення [23]:

$$W_m = \frac{k \bar{H}_c P_m}{1000}, \quad (2.39)$$

де $\bar{H}_c$ - сумарна середньомісячна добова інсоляція на похилу поверхню, кВт·год / (м²·добу);

P_m – номінальна потужність фотоелектричного модуля за стандартних умов тестування, Вт;

1000 – еталонна інтенсивність сонячного випромінювання для STC, Вт/м².

k – коригувальний коефіцієнт.

Поправочний множник k у формулі (2.39) має значення 0,5 влітку та 0,7 взимку. Він допомагає врахувати реальні втрати: влітку панелі розігріваються при експлуатації на сонці, що призводить до зменшення їх ефективності, а частина променів просто відбивається при надходженні сонячної радіації під кутом до поверхні модуля. Взимку ж коефіцієнт помітно вищий, бо на морозі кремнієві елементи охолоджуються, завдяки чому генерації відбувається з більшою ефективністю.

На основі енергетичного балансу об'єкта за виразом (2.39) визначається сумарна потужність фотоелектричної системи. Розрахунок необхідної кількості модулів $N_{\text{заг}}$ здійснюється шляхом ділення загальної встановленої потужності генерації на номінальну потужність модуля.

За умови ідентичної інсоляції робочих поверхонь фіксованого масиву фотоелектричних модулів, сумарний обсяг генерованої ними електричної енергії дорівнює:

$$W_{\text{вир}} = W_m \cdot n_{\text{array}}. \quad (2.40)$$

Підраховуючи реальну кількість електрики $W_{\text{ФЕС}}$, яку фотоелектрична система виробить за певний час, обов'язково треба врахувати втрати всередині інвертора. Для цього враховують його коефіцієнт корисної дії, який позначають η_{inv} :

$$W_{\text{ФЕС}} = W_{\text{вир}} \cdot \eta_{\text{inv}}. \quad (2.41)$$

2.5 Висновки

В даному розділі представлено методики визначення сонячного енергетичного потенціалу, визначення споживання електричної енергії об'єктом, методика розробки фотоелектричної системи: розрахунок характеристик інвертора, визначення схеми підключення модулів до інвертора, розрахунок схеми підключення АКБ до інвертора та методику розрахунку генерації фотоелектричної системи

3 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

3.1 Вихідні дані

Розробка фотоелектричної системи проводиться для приватного будинку у с-щі Нововоронцовка Херсонської області (рис. 3.1). Будинок має місцеположення $47^{\circ}50'55''$ пн.ш., та $33^{\circ}90'83''$ сх. д.

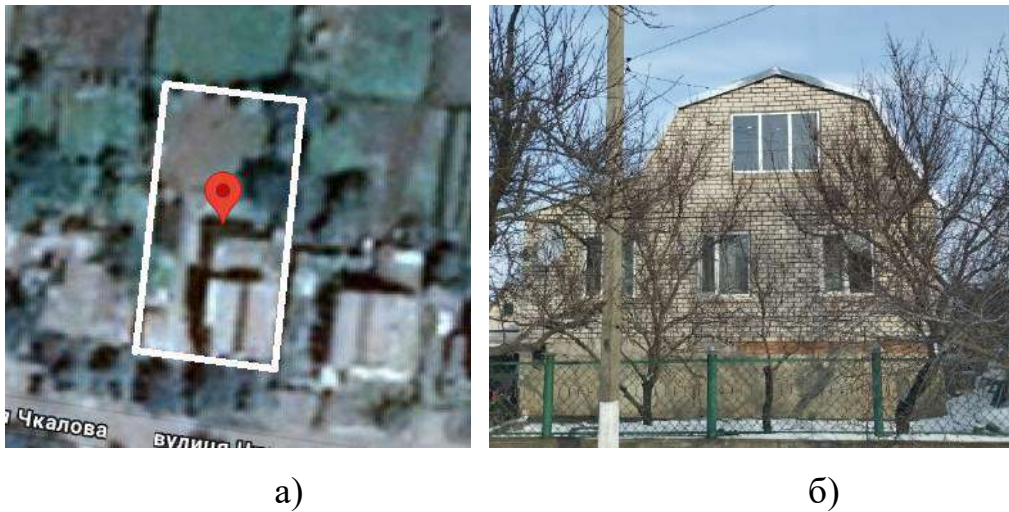


Рисунок 3.1 – Супутниковий знімок будинку (а) та зовнішній вигляд (б)

Площа для розміщення фотоелектричних модулів знаходиться на північ від будинку, і становить близько 200 м^2 , на даній території затінення відсутні. Наявні електроспоживачі в будинку занесені до табл. 3.1.

Договірна потужність становить 5 кВт. Можливі відключення тривалістю до 1 доби. Місячне споживання електроенергії будинку варіюється від $254 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ до $405 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на місяць (табл. 3.2).

Для розрахунку фотоелектричної системи гібридного типу необхідні кліматичні дані за місцем розташування, які визначено з офіційної бази даних NASA [16]. В табл. 3.3 представлено значення добового середньомісячного надходження сумарної H_{th} та дифузної H_{dh} сонячної радіації на горизонтальну поверхню, а також коефіцієнт відбиття (альbedo).

Таблиця 3.1 – Електроспоживачі приватного будинку

№ з/п	Прилад	Потужність, Вт
1	Телевізор	100
2	Водонагрівач	2000
3	Холодильник	150
4	Пральна	1800
5	Мікрохвильова піч	800
6	Праска	2000
7	Ноутбук	65
8	Пилосмок	750
9	Фен	1200
10	Освітлення	90
11	Насос	45

Таблиця 3.2 – Помісячне споживання будинку

Місяць	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Споживання, кВт·год/міс	405	394	381	378	338	319	278	256	268	254	265	328

Таблиця 3.3 – Кліматичні дані щодо сонячної радіації

Місяць	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
H_{dh} , кВт · год/м ²	0,612	1,049	1,55	2,08	2,536	2,368	2,505	2,063	1,607	1,080	0,646	0,476
H_{th} , кВт · год/м ²	1,043	1,881	3,106	4,627	5,916	6,392	6,436	5,674	4,014	2,481	1,159	0,782
альбедо	0,28	0,17	0,12	0,14	0,14	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,17	0,16

3.2 Визначення сонячного енергетичного потенціалу

Оскільки скати покрівлі орієнтовані на Сх та Зх, то встановлення фотоелектричних модулів планується на металевих стійках, виконаних у вигляді односкатної похилої площини з орієнтацією на південь, тобто азимут становить 0°, розміщення буде відбуватися на прибудинковій території. При

встановленні фотоелектричних модулів кут нахилу приймальної поверхні приймаємо 30° , що є оптимальним з точки зору вироблення максимальної кількості енергії для кліматичних умов півдня України та продажу надлишків при підключенні за «зеленим» тарифом.

Розрахунок знаходження сонячної радіації на поверхню модулів визначалося за методикою, наведеною в п. 2.1. Виконуються розрахунки значень сонячної радіації на добу для характерного дня кожного місяця року. Для розрахунку потоку середньомісячної добової сонячної радіації, який надходить на нахилену поверхню спочатку необхідно розрахувати часовий кут сонця ω'_s на похилій поверхні для середнього дня місяця. Наприклад, для характерного дня січня:

$$\omega'_s = \arccos(-\tan(0,891) \cdot \tan(-0,36)) = 1,14 \text{ рад.}$$

Проводимо розрахунок відношення середньомісячної добової прямої радіації на похилій поверхні до радіації на горизонтальній поверхні за місяць:

$$\begin{aligned} \bar{R}_b &= \frac{\cos(0,829 - 0,523) \cdot \cos(-0,36) \cdot \sin 1,14 + \left(\frac{3,14}{180}\right) \cdot 1,14 \cdot \sin(0,829 - 0,523) \cdot \sin(-0,36)}{\cos 0,829 \cdot \cos(-0,36) \cdot \sin 1,14 + \left(\frac{3,14}{180}\right) \cdot 1,14 \cdot \sin 0,829 \cdot \sin(-0,36)} =, \\ &= 2,51. \end{aligned}$$

Тепер можемо розрахувати потік середньомісячної добової сонячної радіації $\bar{H}_C$:

$$\bar{H}_C = 0,43 \cdot 2,51 + 0,61 \cdot \frac{[1 + \cos(0,523)]}{2} + 1,04 \cdot 0,28 \cdot \frac{[1 - \cos(0,523)]}{2} = 1,68 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{м}^2 \text{добу}}.$$

Проведемо розрахунок надходження сонячної радіації на поверхню фотоелектричних модулів за січень:

$$\bar{H}_{CM} = 1,68 \cdot 31 = 51,94 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{м}^2 \cdot \text{міс.}}$$

Розрахунок сонячної радіації що надходить на нахилену поверхню, було проведено для січня місяця, аналогічні розрахунки проводимо для наступних місяців та заносимо дані в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Розраховані значення сонячного енергетичного потенціалу

Місяць	ω_s , рад	R_b	H_c , кВт·год (м ² ·добу)	H_{cm} , кВт·год (м ² ·міс.)
1	1,14	2,51	1,68	51,94
2	1,32	1,94	2,62	73,49
3	1,53	1,49	3,8	117,66
4	1,62	1,18	4,97	149,22
5	1,68	1,00	5,81	180,16
6	1,71	0,94	6,03	181,00
7	1,69	0,96	6,19	192,01
8	1,65	1,10	5,93	183,92
9	1,58	1,35	4,78	143,44
10	1,39	1,76	3,51	108,93
11	1,19	2,33	1,81	54,26
12	1,09	2,74	1,29	40,01

Для оцінки ефективності роботи гібридної фотоелектричної системи з використанням «зеленого» тарифу, необхідні значення місячної радіації, результати розрахунку якої наведено на рис. 3.2 для кута нахилу 30° сонцеприймальної поверхні.

Проаналізувавши графік можемо побачити, що надходження сонячної радіації на приймальну поверхню, значення якого протягом року є нерівномірним, в червні в понад 4,5 рази перевищує значення радіації в грудні, це обумовлено кутом падіння сонячних променів на приймальну поверхню.

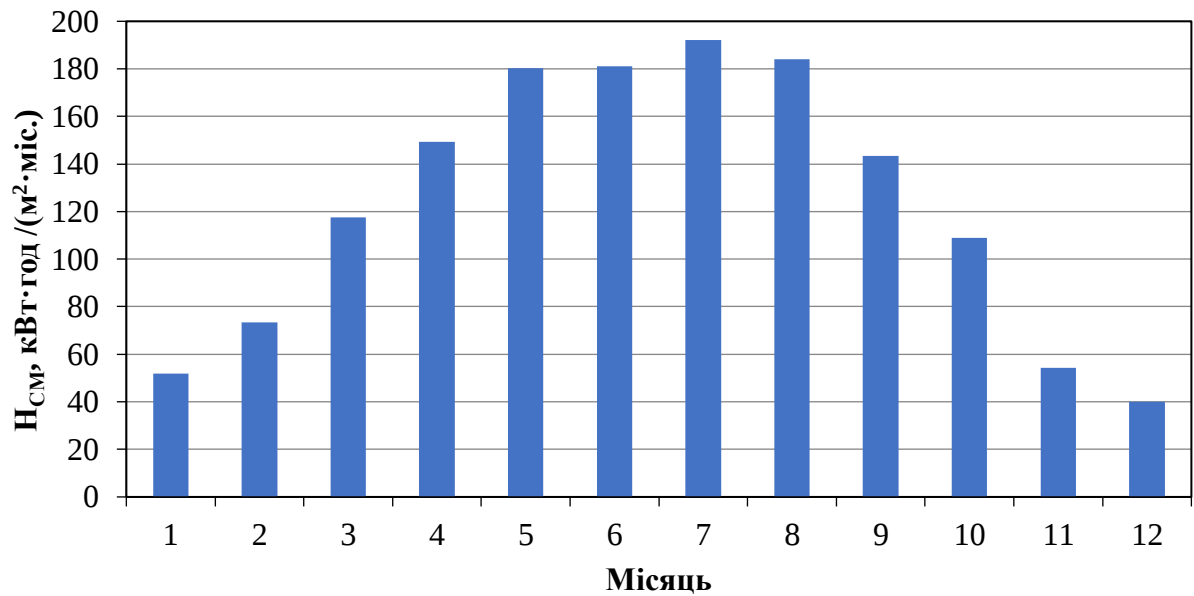


Рисунок 3.2 – Надходження сонячної радіації на приймальну поверхню

3.3 Визначення електроспоживання приватного будинку

Відповідно даних табл. 3.1 споживання електроенергії об'єктом зростає в зимові місяці, що обумовлено використанням бойлеру та зростання тривалості використання освітлення. Середньомісячні добові споживання коливаються від 8,19 кВт·год/добу до 14,4 кВт·год/добу.

На основі даних потужності та режимів використання електроспоживачів визначено максимальне добове споживання (табл. 3.5), та побудовано погодинний графік навантаження за добу (рис. 3.3).

Таблиця 3.5 – Навантаження змінного струму

Прилад	Навантаження змінного струму, Вт·год/добу	t, год./добу	Потужність, Вт
1	2	3	4
Телевізор	445	4,5	100
Водонагрівач	6000	3,	2000
Холодильник	500	3,3	150
Пральна	3300	1,8	1800

Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
Мікрохвильова піч	333	0,4	800
Праска	833	0,4	2000
Ноутбук	639	9,8	65
Пилосмок	375	0,5	750
Фен	200	0,2	1200
Освітлення	668	7,4	90
Насос	1080	24	45

Максимальне споживання змінного струму за добу становить 14,373 кВт·год/добу.

Для побудови графіка навантажень було використано 5 хвилинний крок зміни потужності навантаження, це дало змогу з найбільшою ймовірністю визначити пікове навантаження, яке становить 4000 Вт.

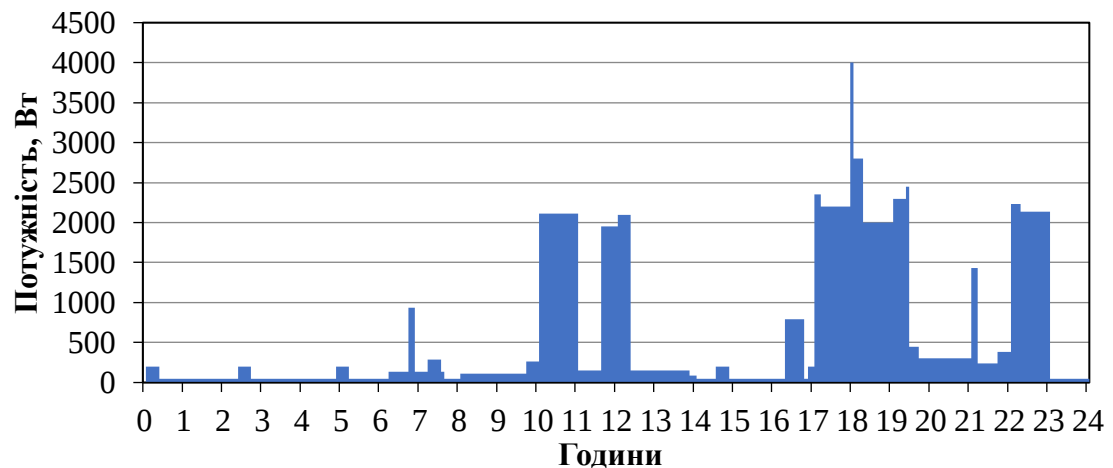


Рисунок 3.3 – Погодинний графік навантаження

3.4 Розробка фотоелектричної системи

Максимальна потужність навантаження становить 4 кВт, з урахуванням коефіцієнту запасу 1,2, який враховує в себе можливе збільшення навантаження, визначаємо орієнтовну розрахункову потужність інвертора:

$$P_{\text{інв}}^{\text{ном}} = 4 \cdot 1,2 = 4,8 \text{ кВт.}$$

Розрахункова встановлена потужність інвертора складає 4,8 кВт, найближче стандартизоване значення потужності інвертора 5 кВт, тож приймаємо до встановлення гібридний інвертор потужністю 5 кВт, виробника Deye.

Гібридний інвертор Deye SUN-5K-SG01LP1-US (рис. В.1) являє собою багатофункціональну інтегровану систему, яка поєднує в собі функції перетворювача напруги, контролера заряду від фотоелектричних модулів та зарядного пристрою для акумуляторних батарей з метою забезпечення безперебійного електропостачання в умовах компактного формфактора [24]. Завдяки наявності дисплея та панелі керування з кнопками, користувач має можливість здійснювати налаштування робочих параметрів системи відповідно до специфіки експлуатації. Зокрема, інтерфейс дозволяє конфігурувати режими заряду акумуляторів, встановлювати пріоритетність джерел живлення (мережа змінного струму або сонячна генерація), а також задавати діапазон допустимої вхідної напруги для адаптації до різних типів навантаження. При відключенні мережі інвертор починає використовувати енергію батарей та фотоелектричних модулів для забезпечення стабільного живлення обладнання. Пристрій може бути підключений до мережі Інтернет для моніторингу та управління віддалено через мобільний додаток. Через розумний порт (Smart Load) до інвертора можна підключити або навантаження або додатковий генератор (дизельний або вітрогенератор), керування роботою яких здійснюється через налаштування інвертора (рис. В.2). Має вбудовані захисти від перенапруги, надмірного струму та короткого замикання. Характеристики інвертора наведені в табл. В.1.

Оскільки планується встановлення резервної ємності для забезпечення живлення об'єкту не менше ніж на 1 добу, то проводимо розрахунки необхідної ємності акумуляторів використовуючи формулу нижче. Обираємо номінальну напругу акумулятора, діапазон вхідних напруг інвертора

становить від 40 В до 60 В. Попередньо обираємо тип акумулятора, це літій-залізо-фосфатний, (LiFePO₄), а для зменшення струмів при максимальному навантаженні інвертора обираємо максимально допустиму напругу акумулятора з номінальним значенням 51,2 В, тобто робочий діапазон акумулятор становить від 44.8 В до 57.6 В. Необхідна розрахункова ємність акумуляторів для 1 доби енергозабезпечення об'єкта:

$$AC_{C-l}^C = \frac{\left(\frac{14,373}{0,95 \cdot 0,97 \cdot 0,97 \cdot (100 - 2)} \right)}{51,2} = 320,47 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

Далі знаходимо розрахункову встановлену ємність АКБ за формулою:

$$C_{bat} = \frac{320,47 \cdot 1 \cdot 1,15 \cdot 1,01 \cdot 1}{0,8} = 465,3 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

Для перебування будинку на живлені від системи акумуляторів не використовуючи інші джерела енергії необхідно встановити акумуляторну установку загальною ємністю як найближче до 465,3 А·год.

До встановлення приймаємо акумуляторні батареї ємністю 230 А·год та напругою 51,2 В від виробника Deue, модель SE-F12 (рис. В.3), характеристики якого наведені в табл. В.2 [25].

Розраховуємо струм заряду 1 АКБ, приймаємо струм заряду 25% від ємності акумулятору, це продовжить його термін служби, оскільки такий відсоток від ємності не дасть акумуляторам перегріватися:

$$I_{зар} = 0,25 \cdot 230 = 57,5 \text{ А.}$$

Визначаємо кількість паралельно під'єднаних акумуляторів до інвертора відповідно струму зарядки інвертора, який становить 120 А:

$$n_{\text{пар}} = \frac{120}{57,5} = 2,087.$$

Розрахувавши кількість АКБ отримали значення 2,087, округлюємо до найближчого меншого, тобто паралельно з'єднуємо 2 акумулятори. Після чого розраховуємо кількість АКБ підключених послідовно, для цього необхідно максимальну напругу інвертора на вході підключення АКБ поділити на номінальну напругу акумуляторної батареї:

$$n_{\text{пос}} = \frac{60}{51,2} = 1.$$

Для нормальної роботи інвертора допустимо приєднати лише один літій-залізо-фосфатний акумулятор. Отже приймаємо до встановлення 2 під'єднані паралельно акумулятори з ємністю 230 А·год кожен. Та можемо розрахувати фактично встановлену ємність, А·год:

$$C_{\text{факт}}^{\text{АКБ}} = 230 \cdot 2 = 460 \text{ А} \cdot \text{год}.$$

Знаючи встановлену ємність акумуляторної батареї, можемо розрахувати доступну ємність, тобто потрібно фактичну ємність помножити на глибину розряду, яку приймаємо 80%, щоб подовжити термін служби АКБ:

$$C_{\text{дос}} = 460 \cdot 0,8 = 368 \text{ А} \cdot \text{год}.$$

Також розрахуємо загальну доступну енергоемність:

$$W_{\text{дос}} = 368 \cdot 51,2 = 18840,6 \text{ Вт} \cdot \text{год}.$$

Знаючи доступну енергоемність розраховуємо кількість діб

акумулявання:

$$n_{\text{дїб}} = \frac{18840,6}{14373} = 1,3 \text{ дїб.}$$

Після всіх розрахунків акумуляторної батареї можемо визначити кількість дїб живлення будинку від акумуляторів не використовуючи інші джерела енергії, це 1,3 доби, або близько 30 годин для дїб з максимальним енергоспоживанням 14,373 кВт·год/добу. Для мінімального добового споживання 8,19 кВт·год/добу блок акумуляторних батарей здатен забезпечити живлення протягом 55 год. (2,3 доби).

Після розрахунку та підбору інвертора та акумуляторів, необхідно підібрати фотоелектричні модулі, та їх кількість.

Приймаємо до встановлення фотоелектричні модулі виробника Longi модель LR5-54НІН-400М потужністю 400 Вт, характеристики якого наведено у табл. В.3 та зовнішній вигляд на рис. В.4.

Визначаємо мінімальну вихідну напругу модуля як напругу в точці максимальної потужності при максимально можливій температурі експлуатації:

$$U_{\min}^{mod} = 30,75 \cdot \left[1 - \frac{0,265}{100} \cdot (70 - 25) \right] = 27,08 \text{ В.}$$

Мінімальна кількість послідовно з'єднаних в групу фотоелектричних модулів, необхідна для запуску MPP трека інвертора:

$$n_{str}^{min,mod} \leq \frac{150}{27,08} = 5,54.$$

Розрахункове значення мінімальної кількості модулів становить 5,54, округлюємо до більшого цілого значення, тобто 6 шт.

Визначаємо максимальну вихідну напругу модуля як напругу холостого ходу при мінімально можливій температурі експлуатації:

$$U_{\max_{oc}}^{mod} = 36,75 \cdot \left[1 - \frac{0,265}{100} \cdot (-25 - 25) \right] = 41,62 \text{ В.}$$

Максимальна кількість послідовно з'єднаних в групу фотоелектричних модулів обмежується максимальною напругою на вході інвертора:

$$n_{str}^{max,mod} \leq \frac{500}{41,62} = 12,01.$$

Розрахункове значення максимальної кількості модулів 12,01 округлюємо до меншого цілого значення 12 шт., оскільки якщо округлити до більшого значення, то значення максимальної вихідної напруги фотоелектричних модулів перевищить максимальну вхідну напруга інвертора. Отже, для забезпечення роботи інвертора у вказаному в специфікації діапазоні напруг до МРР трекерів необхідно підключати групи з послідовно з'єднаних фотоелектричних модулів довжиною від 6 до 12 од.

Для максимально можливої кількості модулів у групі визначимо робочий діапазон напруг. Мінімальна напруга групи з 12 послідовно з'єднаних фотоелектричних модулів:

$$U_{\min}^{\Phi EM} = 27,08 \cdot 12 = 325 \text{ В.}$$

Максимальна напруга групи послідовно з'єднаних фотоелектричних модулів:

$$U_{\max}^{\Phi EM} = 41,62 \cdot 12 = 499,4 \text{ В.}$$

Максимальна та мінімальна напруги групи модулів лежать в робочому діапазоні напруг інвертора на вході ФЕП від 125 В до 500 В.

Для визначення загальної кількості фотоелектричних модулів, необхідних для покриття річного енергоспоживання об'єкта, розраховуємо середньорічне вироблення енергії постійного струму модулем за рік. Для цього необхідно розрахувати ці значення для кожного місяця та взяти середнє значення. Розрахунок проведемо для січня місяця:

$$W_m = \frac{0,7 \cdot 1,68 \cdot 400}{1000} = 0,469 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{м}^2 \cdot \text{добу}}.$$

Коефіцієнт k в даному випадку становить 0,7, оскільки розрахунки проводяться для зимового періоду, для літнього він становить 0,5. З використанням поліноміальної функції другого порядку опишемо залежність коефіцієнту k від номера місяця, та розраховуємо помісячне вироблення енергії постійного струму, з цих значень знаходимо середньорічне вироблення енергії фотоелектричним модулем $W_m = 0,886 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{м}^2 \cdot \text{добу}}.$

Розраховуємо необхідну кількість фотоелектричних модулів. Округлюємо до меншого цілого значення, щоб не перебільшувати вхідну потужність інвертора на вході від ФЕП:

$$N_m = \frac{14,373}{\frac{0,886}{0,97}} = 16.$$

Отже, для покриття річного навантаження об'єкта достатньо масиву з 16 фотоелектричних модулів.

Мінімальну кількість груп послідовно з'єднаних модулів, підключених до інвертора, визначаємо за формулою нижче з округленням в більший бік:

$$n_{str}^{min} = \frac{16}{12} = 2.$$

Максимальна сила струму, що генерується одним модулем розраховується за формулою:

$$I_{\max_{sc}}^{mod} = 13,75 \left[1 + \frac{0,05}{100} \cdot (70 - 25) \right] = 14,07 \text{ A.}$$

Кількість послідовно з'єднаних груп, паралельно приєднаних до 1 MPP трекера, обмежується максимальним струмом на вході трекера. Розраховане значення округлюємо до меншого цілого значення:

$$N_{\text{пос}} = \frac{20}{14,07} = 1.$$

Отже, до кожного з двох MPP трекерів інвертора можна приєднати одну групу послідовно з'єднаних фотоелектричних модулів.

Номінальна потужність масиву фотоелектричних модулів P_{array} (Вт) розраховується за формулою:

$$P_{array} = 16 \cdot 400 = 6400 \text{ Вт.}$$

Це значення не перевищує максимальну потужність дозволеної до приєднання на вхід інвертора, тож з урахуванням визначеного розміру масиву модулів $n_{array} = 16$, на кожен MPP трекер під'єднаємо по одній групі з послідовно з'єднаних 8 модулів.

Проведемо підбір кабельної продукції та автоматичних вимикачів (рис.В.5).

Перед підключенням до мережі, необхідно, встановити окремий автоматичний вимикач між інвертором та мережею. Також рекомендується

встановити автоматичний вимикач змінного струму між резервним навантаженням та інвертором. Це забезпечить надійне відключення інвертора під час технічного обслуговування та повний захист від перевантаження по струму. Рекомендований вимикач змінного струму для 5 кВт становить 40 А.

Перед підключенням фотоелектричних модулів, необхідно встановити автоматичний вимикач постійного струму між інвертором та фотоелектричними модулями. Номінальний струм повинен бути більшим 17,6 А, обираємо на 20 А.

Для захисту від надмірного струму між інвертором та акумуляторними батареями необхідно встановити автоматичні вимикач постійного струму на 150 А.

Підключаючи інвертор до живлення від акумулятора, рекомендується обирати кабель перерізом 35 мм², для підключення виходу до енергоспоживачів будинку та мережі переріз 4 мм². Для підключення фотоелектричних модулів обирається переріз 4 мм² та використовується кабель визначеного типу зі стійкістю до механічних пошкоджень та стійкі до ультрафіолету. Обрані автоматичні вимикачі та кабельну продукцію представлено у табл. В.4 [26-31].

3.5 Розрахунок вироблення енергії фотоелектричною системою

Визначаємо кількість енергії $W_{ФЕС}$, яку виробить сонячна електростанція за місяць, враховуємо втрати енергії в інверторі, ефективність якого становить 97%. Для цього розрахунку необхідно визначити загальну площу модулів S_{array} :

$$S_{array} = 1,722 \cdot 1,134 \cdot 16 = 31,24 \text{ м}^2.$$

$$W_{ФЕС} = 0,469 \cdot 31,24 \cdot 31 \cdot 0,97 = 440,8 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{міс}}.$$

Значення 440,8 кВт·год/міс. отримали при розрахунках для січня місяця, для всіх наступних місяців проводимо аналогічні розрахунки та заносимо до табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Помісячне вироблення енергії

Місяць	Вироблення енергії, кВт·год / (м ² ·добу)	Вироблення енергії, кВт·год / місяць
1	0,47	440,80
2	0,67	564,32
3	0,88	827,54
4	1,08	977,54
5	1,19	1122,56
6	1,21	1099,31
7	1,24	1167,09
8	1,22	1148,68
9	1,04	943,17
10	0,82	769,89
11	0,46	418,97
12	0,36	341,66
Рік	-	9821,5

На рис. 3.4 наведено помісячну порівняльну діаграму генерації фотоелектричної системи та споживання будинку, річна генерація переважає річне споживання в понад 2,5 рази.

Обсяги виробництва електроенергії мають сезонну залежність, що відповідає фотоелектричним системам. Мінімальні значення генерації у грудні становлять 341 кВт·год/міс., а в січні 440 кВт·год/міс. Починаючи з весняного періоду, виробництво зростає і досягає свого піку в літні місяці 1167 кВт·год/міс. Восени спостерігається поступове спадання генерації.

Графік споживання є близьким до стабільного, але має збільшення в холодну пору року. Найвищий рівень споживання спостерігається в січні та лютому, 394–405 кВт·год, що, найчастіше, пов'язано з використанням

бойлеру, додаткових електроопалювальних приладів та довшим використанням освітлення. У літній період споживання знижується до свого мінімуму 256–278 кВт·год.

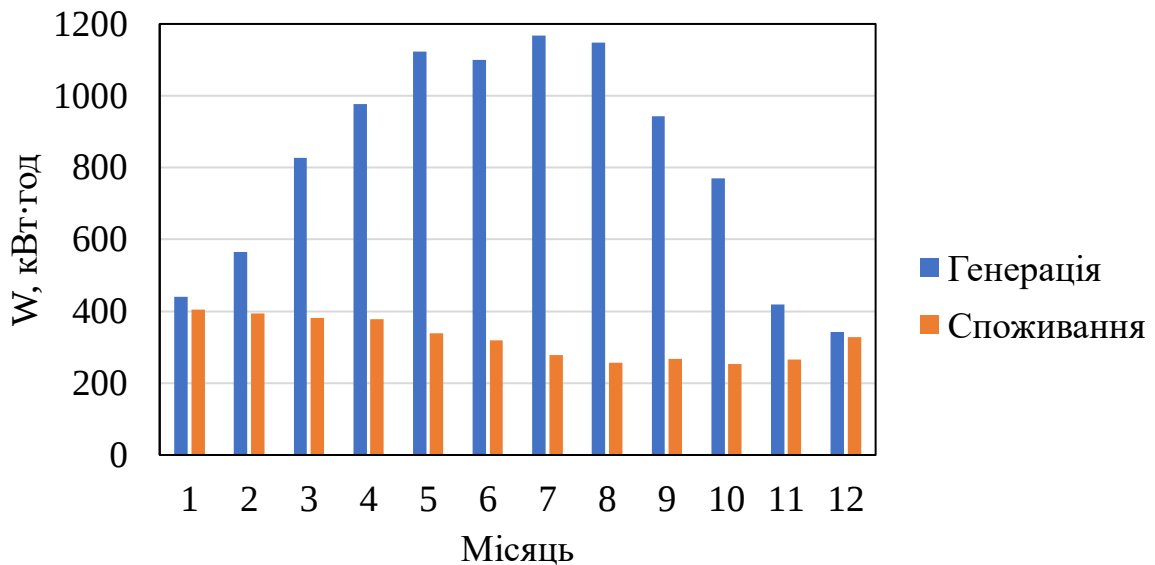


Рисунок 3.4 – Порівняння генерації та споживання електричної енергії

Особливістю системи є те, що обсяг генерованої енергії в кожному місяці перевищує обсяг споживання, навіть у зимові місяці генерація покриває потреби. У весняно-літній період спостерігається профіцит енергії, тобто виробництво перевищує внутрішнє споживання у 3-4 рази, завдяки гібридному інвертору надлишок йде в центральну мережу, та продається за «зеленим» тарифом.

3.6 Висновки

Проведено розробку фотоелектричної системи, призначеної для безперервного енергозабезпечення приватного будинку у с. Нововоронцовка Херсонської області.

На основі кліматичних даних бази NASA визначено надходження сонячної радіації на приймальну поверхню масиву фотоелектричних модулів,

орієнтованих на південь та нахилених під кутом 30° , який є оптимальним для отримання максимальної інсоляції поверхні модулів.

Проведено аналіз електроспоживання приватного будинку. Встановлено, що максимальне добове споживання змінного струму становить $14,37 \text{ кВт} \cdot \text{год/добу}$, мінімальне $8,19 \text{ кВт} \cdot \text{год/добу}$, пікова потужність 4 кВт .

Для забезпечення безперебійності електропостачання запропоновано гібридну фотоелектричну систему, для якої обрано однофазний гібридний інвертор Deye SUN-5K-SG01LP1-US номінальною потужністю 5 кВт , монокристалічні фотоелектричні модулі Longi LR5-54N1H-400M та літій-залізо-фосфатні акумуляторні батареї Deye SE-F12 ($51,2 \text{ В}$, $230 \text{ А} \cdot \text{год}$).

Визначено потужність $6,4 \text{ кВт}$ та схему підключення масиву фотоелектричних модулів, за якою модулі розділено на дві паралельні групи по 8 послідовно з'єднаних одиниць, що повністю відповідає оптимальному робочому діапазону вхідної напруги інвертора.

Розраховано параметри системи акумуляування енергії. До встановлення прийнято 2 акумуляторні батареї, з'єднані паралельно, що забезпечує фактичну ємність системи $460 \text{ А} \cdot \text{год}$ та доступну енергоемність $18840,6 \text{ Вт} \cdot \text{год}$ при рекомендованій глибині розряду 80% . Даний накопичувач гарантує тривалість автономного живлення об'єкта від 30 до 55 год. у разі аварійного вимкнення зовнішньої мережі.

Визначено річне вироблення електроенергії фотоелектричною системою $9821,5 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$, що в понад 2,5 рази перевищує сумарні річні потреби домогосподарства. Доведено, що ФЕС повністю покриває навантаження навіть у зимові місяці, а значний весняно-літній профіцит енергії (із максимумом $1167,09 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ у липні) створює технічні умови для продажу надлишків у централізовану мережу за «зеленим» тарифом.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Теоретико-методологічні основи безпеки праці та класифікація ризиків

В системі «людина - виробниче середовище» базовим є поняття небезпеки, властивості оточення, що через негативні фактори призводить до травм, погіршення здоров'я або смерті. Безпека - це стан діяльності, за якого ймовірність прояву небезпек мінімізована, а професійний ризик не перевищує прийняттого рівня.

За походженням професійні ризики поділяють на:

Мотивовані (обґрунтовані): свідоме наражання на небезпеку задля порятунку людей чи ліквідації аварій.

Невмотивовані (необґрунтовані): наслідок свідомого порушення працівниками правил безпеки та невикористання засобів захисту.

4.2 Виробничий травматизм і професійні захворювання

Реалізація небезпечних чинників призводить до нещасних випадків та виробничих травм (порушень цілісності тканин чи функцій організму).

За характером дії чинника травми бувають: механічні, термічні, хімічні, електротравми, баротравми, психічні та комбіновані.

Професійні захворювання виникають через тривалий, систематичний вплив шкідливих чинників (наприклад: вібраційна хвороба від вібрації, приглухуватість від шуму, променева хвороба від випромінювання).

4.3 Виробниче середовище

Вибір оптимальних метеоумов.

Оптимальні метеоумови (температура, відносна вологість, швидкість

руху повітря) визначаються за ДСП 173-96 залежно від періоду року (теплий або холодний/перехідний) та категорії важкості робіт за енерговитратами:

I категорія (легкі): до 150 кКал/год (робота сидячи, стоячи, без перенесення важких речей).

II категорія (середньої тяжкості): до 250 кКал/год (постійна ходьба, перенесення вантажів до 10 кг).

III категорія (важкі): понад 250 кКал/год (систематичне напруження, перенесення вантажів понад 10 кг).

Надлишок явного тепла – залишкова кількість теплоти (від обладнання, людей тощо), що безпосередньо впливає на зміну температури повітря після виконання всіх захисних заходів.

Для правильного вибору оптимальних метеоумов в різні періоди року необхідно розрахувати кількість надлишкового явного тепла і встановити категорію робіт, після чого по таблиці [32] с. 72 - 81 і [33] с. 290-298 визначити оптимальні метеоумови

Виробниче освітлення.

Поділяється на природне (спектрально комфортне, добре розсіюється) та штучне (використовується за недостатності сонячного світла).

Природне освітлення.

Здійснюється через вікна (бічне), ліхтарі (верхнє) або комбіновано. Оцінюється коефіцієнтом природної освітленості (КПО, %):

$$\text{к. п. о.} = \frac{E_{\text{вн}}}{E_{\text{зов}}} \cdot 100\%. \quad (4.1)$$

Нормування КПО (за ДБН В.2.5-28:2018):

$$e^H = e \cdot t \cdot c, \quad (4.2)$$

де e – значення к. п. о., яке визначається з урахуванням характеру зорової роботи, %. Визначається з табл. 3.1 [34] (або додатки с. 26);

m – коефіцієнт світлового клімату, визначається в залежності від району розташування будівлі на території СНД [34], рис. 1., табл. 4 .;

c – коефіцієнт сонячності клімату, визначається по [34], рис, 1, табл. 5.

Скло світлових прорізів підлягає обов'язковому очищенню 2–4 рази на рік.

Штучне освітлення. Системи і види освітлення.

Системи: загальна (рівномірна чи локалізована) та комбінована (загальна та місцева). Робота виключно за місцевого освітлення заборонена.

Види за призначенням: робоче (постійне) та аварійне (для евакуації чи продовження робіт; мінімум 5% від норми робочого світла, але не менше 2 лк).

Джерела світла: газорозрядні лампи (люмінесцентні, ДРЛ, металогалогенні, натрієві – світловіддача 50–120 лм/Вт, забезпечують 80% промислового освітлення) та лампи розжарювання.

Висота установки і розміщення світильників.

Відстань між світильниками (L) залежить від типу кривої сили світла та висоти підвісу над робочою поверхнею (h):

$$H = h_p - h_c, \quad (4.2)$$

де: H – висота приміщення;

h_p – висота робочої поверхні;

h_c – звис світильника від стелі.

Відстань між світильниками або рядами світильників, (L') визначають залежно від типу кривої сили світла світильника [35] с. 52.

При проектуванні системи освітлення в будь-якому виробничому чи офіційному приміщенні вкрай важливо правильно розрахувати крок розміщення джерел світла. Головним орієнтиром тут виступає висота підвісу світильника над робочою поверхнею (h). Залежно від того, яку саме оптичну схему має обладнання, відстань між сусідніми точками або цілими рядами

може суттєво різнитися. Всі базові коефіцієнти для розрахунків наведені в табл. 4.1. Як можна помітити з цих даних, для світильників із концентрованим світлорозподілом (тип К) потрібен досить щільний крок розташування, тоді як пристрої з рівномірною або широкою кривою (типи Л та М) дозволяють розсунути світлові точки значно далі одна від одної без втрати якості освітлення.

Таблиця 4.1 – Залежність відстані між світильниками від типу кривої сили світла

Тип кривої сили світла світильника	Відстань між світильниками або рядами світильників, L
К	$(0,4-0,7) \cdot h$
Г	$(0,8-1,1) \cdot h$
Д	$(1,4-1,6) \cdot h$
Л	$(1,6-1,8) \cdot h$
М	$(1,8-2,6) \cdot h$

Методи перевірки освітлення.

1. Для розрахунку освітленості виробничих приміщень рекомендується використовувати метод коефіцієнта використання. За цим методом необхідна величина світлового потоку джерел світла в кожному світильнику визначається за формулою [35] 124 с.:

$$\Phi = \frac{E \cdot S \cdot K \cdot z}{N \cdot \eta}, \text{ лм} \quad (4.3)$$

де E – задана мінімальна освітленість, лк;

K – коефіцієнт запасу [35], табл. 4-9 (люмінесцентні – 1,2; розжарювання – 1,1 світлодіодні – 1);

S – освітлювана площа, м²;

z – коефіцієнт нерівномірності освітлення, для лампи розжарювання і ДРЛ

z = 1,15, для люмінесцентних та світлодіодних ламп z = 1.1;

N – число світильників;

η – коефіцієнт використання світлового потоку в частках одиниці.

Визначають за таблицями [36], 135-13с. в залежності від індексу приміщення, типу світильників і коефіцієнтів відбиття стелі, стін розрахункової поверхні та підлоги [35], табл. 5 -1.

Індекс приміщення знаходять за формулою:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)}, \quad (4.4)$$

де A і B - довжина і ширина приміщення, м.

2. Точковий метод: використовується для локалізованого, місцевого або аварійного освітлення, похилих поверхонь та темних інтер'єрів.

4.4 Пожежна безпека

Пожежа – неконтрольоване горіння. За швидкістю поширення: дефлаграційне (до десятків м/с), вибухове (до сотень м/с), детонаційне (до тисяч м/с). Рідини: легкозаймисті (ЛЗР, температура спалаху до 61°C) та горючі (ГР, температура спалаху понад 61°C). Причини пожеж: порушення технологій (33%), несправна електрика (16%), самозаймання (10%).

Для забезпечення надійного захисту персоналу та технологічного обладнання на підприємстві першочерговим завданням є визначення ступеня пожежної небезпеки всіх об'єктів. Відповідно до нормативних вимог, класифікація будівель та кімнат здійснюється на основі властивостей речовин, що в них використовуються, зберігаються або обробляються.

Детальний розподіл об'єктів за ступенем небезпеки наведено в табл. 4.2. На основі цих даних для кожного сектору підприємства розробляється індивідуальний комплекс протипожежних заходів, включаючи вибір типу

вентиляції, категорію електрообладнання та системи автоматичного гасіння.

Таблиця 4.2 – Категорії приміщень із вибухопожежної небезпеки [33]

Категорія приміщення	Характеристика речовин та матеріалів, що знаходяться в приміщенні
А Вибухонебезпечна	Горючі гази, ЛЗР з т. спалаху до 28°C; речовини, що вибухають/горять від води чи кисню. Надлишковий тиск вибуху понад 5 кПа
Б Вибухонебезпечна	Горючі пили/волокна, ЛЗР з т. спалаху понад 28°C, здатні утворювати вибухонебезпечні суміші з тиском вибуху понад 5 кПа
В1 - В4 Вибухонебезпечні	Горючі та важкогорючі рідини, тверді речовини, пил і волокна, здатні при взаємодії лише горіти
Г	Негорючі матеріали у гарячому чи розплавленому стані (виділення тепла, іскор); горючі речовини, що спалюються як паливо
Д	Негорючі речовини та матеріали у холодному стані

4.5 Техніко-економічні розрахунки заходів з охорони праці

Витрати компанії на охорону праці (до 2.5–3% від собівартості продукції) діляться на: фінансування покращення умов праці, компенсації за шкідливість (засоби індивідуального захисту, пільги) та ліквідацію наслідків (лікарняні, інвалідність).

$$П = \left(\frac{K_2}{K_1} - 1 \right) \cdot 100 \cdot K, \quad (4.5)$$

де K_1 K_2 – інтегральні показники працездатності людини до і після поліпшення умов праці;

K – коефіцієнт, що враховує вплив зростання працездатності на продуктивність праці ($K = 0,2$).

K_1 і K_2 розраховуються за формулою:

$$K_{1,2} = 10^2 - \left(\frac{U_T - 15,6}{0,64} \right), \quad (4.6)$$

де U_T – інтегральна бальна оцінка важкості праці (K_1 до впровадження заходів, щодо охорони праці;

K_2 – після впровадження заходів.

$$U_T = \left[X_1 + \left(\sum_{i=1}^n X_i \cdot \frac{6 - X_1}{(n - 1) \cdot 6} \right) \right], \quad (4.7)$$

де X_1 – елемент умов праці, який отримав найвищу оцінку в балах;

X_i – сума балів, всіх інших елементів умов праці за вирахуванням X_1

n – кількість елементів умов праці.

4.6 Висновки

1. Було розглянуто теоретико-методологічні основи безпеки праці, базові поняття небезпеки та класифікацію професійних ризиків на мотивовані (обґрунтовані) й невмотивовані (необґрунтовані). Описано сутність виробничого травматизму, наведено класифікацію травм за характером дії чинника (механічні, термічні, хімічні тощо) та визначено причини виникнення професійних захворювань внаслідок тривалого впливу шкідливих факторів.

2. Проаналізовано параметри виробничого середовища, зокрема порядок вибору оптимальних метеоумов згідно з ДСП 173-96. Визначено три категорії важкості робіт за рівнем енерговитрат організму та окреслено методику розрахунку надлишку явного тепла для встановлення належних чинників мікроклімату в різні періоди року.

3. Розглянуто системи та види виробничого освітлення, включаючи природне та штучне (робоче й аварійне). Наведено нормативні вимоги до нормування коефіцієнта природної освітленості (КПО) відповідно до ДБН

В.2.5-28:2018, а також детально описано інженерні методи перевірки й розрахунку штучної освітленості приміщень за методом коефіцієнта використання та точковим методом.

4. Охарактеризовано основні аспекти пожежної безпеки, класифікацію горіння за швидкістю поширення та ключові причини виникнення пожеж на підприємствах. Представлено нормативну класифікацію приміщень за категоріями вибухопожежної небезпеки (від вибухонебезпечних А і Б до негорючих Г і Д) залежно від характеристик речовин, що в них використовуються.

5. Окреслено техніко-економічні розрахунки заходів з охорони праці та структурування відповідних витрат компанії (на рівні 2.5–3% від собівартості). Наведено математичний апарат для обчислення інтегральної бальної оцінки важкості праці (U_T), визначення показників працездатності людини до і після впровадження покращень, а також розрахунку підсумкового зростання продуктивності праці.

ВИСНОВКИ

Проведено розробку фотоелектричної системи, призначеної для безперервного енергозабезпечення приватного будинку у с. Нововоронцовка Херсонської області.

На основі кліматичних даних бази NASA визначено надходження сонячної радіації на приймальну поверхню масиву фотоелектричних модулів, орієнтованих на південь та нахилених під кутом 30° , який є оптимальним для отримання максимальної інсоляції поверхні модулів.

Проведено аналіз електроспоживання приватного будинку. Встановлено, що максимальне добове споживання змінного струму становить $14,37 \text{ кВт} \cdot \text{год/добу}$, мінімальне $8,19 \text{ кВт} \cdot \text{год/добу}$, пікова потужність 4 кВт .

Для забезпечення безперебійності електропостачання запропоновано гібридну фотоелектричну систему, для якої обрано однофазний гібридний інвертор Deye SUN-5K-SG01LP1-US номінальною потужністю 5 кВт , монокристалічні фотоелектричні модулі Longi LR5-54NHN-400M та літій-залізо-фосфатні акумуляторні батареї Deye SE-F12 ($51,2 \text{ В}$, $230 \text{ А} \cdot \text{год}$).

Визначено потужність $6,4 \text{ кВт}$ та схему підключення масиву фотоелектричних модулів, за якою модулі розділено на дві паралельні групи по 8 послідовно з'єднаних одиниць, що повністю відповідає оптимальному робочому діапазону вхідної напруги інвертора.

Розраховано параметри системи акумуляування енергії. До встановлення прийнято 2 акумуляторні батареї, з'єднані паралельно, що забезпечує фактичну ємність системи $460 \text{ А} \cdot \text{год}$ та доступну енергоемність $18840,6 \text{ Вт} \cdot \text{год}$ при рекомендованій глибині розряду 80% . Даний накопичувач гарантує тривалість автономного живлення об'єкта від 30 до 55 год. у разі аварійного вимкнення зовнішньої мережі.

Визначено річне вироблення електроенергії фотоелектричною системою $9,8 \text{ МВт} \cdot \text{год}$, яке перевищує сумарні річні потреби домогосподарства в понад 2,5 рази. Доведено, що ФЕС повністю покриває навантаження навіть у зимові

місяці, а значний весняно-літній профіцит енергії створює технічні умови для продажу надлишків 5,9 МВт·год у централізовану мережу за «зеленим» тарифом.

У розділі «Охорона праці» виконано комплексний аналіз професійних ризиків, виробничого травматизму та профзахворювань. Охарактеризовано параметри виробничого середовища: розглянуто вибір оптимального мікроклімату за ДСП 173-96 залежно від важкості робіт, а також наведено методику розрахунку природного й штучного освітлення приміщень. Сформульовано заходи з пожежної безпеки із чітким визначенням категорій приміщень за вибухопожежною небезпекою. Крім того, наведено математичний апарат для техніко-економічного оцінювання ефективності впроваджених рішень за критеріями зростання працездатності та продуктивності праці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Підвищення якості електричної енергії в мережі з сонячними електростанціями в режимі зниження генерованої потужності [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/7d2f0837-f7a0-436a-99cc-c4e8a4a6f3af> (дата звернення: 27.05.2026). – Назва з екрану.
2. Альтернативна енергетика [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ukraineinvest.gov.ua/industries/energy/alternative-energy/> (дата звернення: 10.02.2026). – Назва з екрану.
3. Потужність ВЕС в Україні за підсумками 2021 року зросла майже на третину [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://interfax.com.ua/news/greendeal/791310.html> (дата звернення: 10.02.2026). – Назва з екрану.
4. Поточний стан української сонячної енергетики [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.aseu.solar/about-6> (дата звернення: 13.02.2026). – Назва з екрану.
5. Кабмін оприлюднив текст Стратегії розвитку розподіленої генерації до 2035 року [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://100re.org.ua/kabmin-oprylyudnyv-tekst-strategiyi-rozvytku-rozpodilenoyi-generacziyi-do-2035-roku/> (дата звернення: 15.02.2026). – Назва з екрану.
6. Сонячні станції для генерації електричної енергії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://solarmax.com.ua/pvsolar/> (дата звернення: 18.02.2026). – Назва з екрану.
7. Про схвалення Стратегії розвитку розподіленої генерації на період до 2035 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024 - 2026 роках [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/713-2024-%D1%80#Text> (дата звернення: 18.02.2026). – Назва з екрану.
8. Види сонячних електростанцій в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://solarmarket.com.ua/articles/vidy-solnechnyh->

elektrostantsij-v-ukraine (дата звернення: 21.02.2026). – Назва з екрану.

9. Довідник фотоелектричних модулів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://energystorage.com.ua/spravochnik-fotoelektricheskikh-modulej/https://teplocel.com.ua/ne-vyvodyty/fotoelektrychni-paneli-ta-yih-typu/> (дата звернення: 21.02.2026). – Назва з екрану.

10. Монокристалічні чи полікристалічні сонячні панелі – що краще [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.solargarden.com.ua/monokrystalichni-chy-polikrystalichni-sonyachni-paneli-shho-krashhe/> (дата звернення: 21.02.2026). – Назва з екрану.

11. Дослідження монокристалічних та полікристалічних сонячних панелей для живлення електронних систем [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/47288/21171.pdf?sequence=3&isAllowed=y> (дата звернення: 21.02.2026). – Назва з екрану.

12. Акумуляторні батареї: основні поняття, принцип роботи, історія виникнення. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kwatt.com.ua/chto-takoe-akkumulyator-osnovnye-ponyatiya-printsip-raboty-i-nemnogo-istorii/> (дата звернення: 25.02.2026). – Назва з екрану.

13. Акумулятори для СЕС, як правильно вибрати [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://electro100.ua/blog/akumulyatori-dlya-ses-yak-pravilno-vibrati?srsId=AfmBOool10TOdVfaUIUpkRwRjGQepcUEudr_lTRcm4xENac06hag7DuR (дата звернення: 25.02.2026). – Назва з екрану.

14. Акумуляторні батареї малообслуговуючі типу OPzSE [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pluton.ua/p/brochures/doc/OpZS.pdf> (дата звернення: 2.03.2026). – Назва з екрану.

15. Різновиди, характеристики акумуляторів для СЕС [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://e-si.energy/blog/riznovydy-akamuliyatoriv-dlya-ses> (дата звернення: 5.03.2026). – Назва з екрану.

16. NASA Power [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (дата звернення: 12.03.2026). – Назва з екрану.
17. Duffie J.A. Solar Engineering of Thermal Processes / J.A. Duffie, W.A. Beckman. – Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2013. – 910 p.
18. Методичний посібник для дипломного проектування «Розрахунок системи автономного енергопостачання з використанням фотоелектричних перетворювачів» для студентів спеціальностей 6.090504 «Нетрадиційні джерела енергії», 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» /упорядники: Бекіров Е. А., Воскресенська С.М. 2010 р. - 83с.
19. IEEE Recommended Practice for Sizing Lead-Acid Batteries for Stationary Applications [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://rfc.nop.hu/ieee2/IEEE%20Std%20485%20Lead%20Acid%20Bateries%20Design.pdf> (дата звернення: 15.03.2026). – Назва з екрану.
20. Курак В.В. Основи сонячної електроенергетики. Навчальний посібник для студентів спеціальності 141. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / В.В. Курак, О.В. Андропова, Н.Л. Дон. – Хмельницький: ХНТУ, 2023. – 348 с.
21. Методичні вказівки для курсового проектування з дисципліни "Сонячна енергетика" на тему: "Розрахунок системи автономного енергопостачання з використанням фотоелектричних перетворювачів" / Упорядн.: А.М. Гребенюк, О.О. Суворкін– Дніпропетровськ: Державний ВНЗ, 2016. – 16 с.
22. Розрахунок інвертора для сонячних батарей [Електронний ресурс]– Режим доступу: <http://solarsoul.net/raschet-invertora-dlya-solnechnyx-batarej> (дата звернення: 21.03.2026). – Назва з екрану.
23. Курак В.В. Оцінка вироблення енергії фасадними фотоелектричними системами в кліматичних умовах м. Херсон / В.В. Курак, О.В. Андропова, І.Ф. Погребняк // Вісник ХНТУ. – 2024. – №4(91). – С. 85-90.
24. Інвертор гібридний однофазний Deye SUN-5K-SG01LP1-EU

[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://deps.ua/ua/katalog/solar-inverters-controllers/47933.html> (дата звернення: 7.04.2026). – Назва з екрану.

25. Аккумуляторний блок Deye SE-F12 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://deps.ua/katalog/accumulators-batteries/48825.html> (дата звернення: 12.04.2026). – Назва з екрану.

26. Вимикач постійного струму автоматичний DC 150 ампер ТАІХІ двополюсний від 12 до 240 вольт DC 150A 2P PV 6Ka DIN АКБ DZ47B-125 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://prom.ua/ua/p2565796155-vyklyuchatel-postoyannogo-toka.html> (дата звернення: 19.04.2026). – Назва з екрану.

27. Кабель силовий 35 мм² 600 V НУBSZ до акумулятора, лебідки, стартера, генератора [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://techstor.com.ua/kabel-sylovyi-35-mm-600-v-do-akumuliatora-lebidky-startera-heneratora/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=%7b%7bcampaignName%7d%7d&gad_source=1&gad_campaignid=22715581360&gbraid=0AAAAADPh2GUWdXNYQn0OPMsEHmIVFV0eg&gclid=Cj0KCQjwof_QBhCgARIsADaMzOftvWQR4lK_LJujudrk4sIsPiaqSQ4ZEcdQhziqG0EGzHxlwKeaxM MaAlGOEALw_wcB (дата звернення: 19.04.2026). – Назва з екрану.

28. Автоматичний вимикач постійного струму CHINT NB1-63DC 2P C20 DC500V 20A 6kA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://prom.ua/ua/p2994958766-avtomaticheskij-vyklyuchatel-postoyannogo.html> (дата звернення: 25.04.2026). – Назва з екрану.

29. Кабель сонячний H1Z2Z2-K 4 мм² колір ізоляції чорний [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://sunservis.com.ua/ua/p1486864945-kabel-solnechnyj-h1z2z2.html?srsId=AfmBOorLbXKxmRgOvnZj_d9lxwjpGVZ5RY9DMqoHxtQU3G7S3oqSdxUT (дата звернення: 25.04.2026). – Назва з екрану.

30. Автоматичний вимикач RESI9 Schneider Electric 40 A, 2P, крива C, 6кА R9F12240 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://global->

electro.com.ua/avt-vim-resi9-6ka-2p-40a-c-000209798 (дата звернення: 25.04.2026). – Назва з екрану.

31. Провід ПВС 2х4 Запорізький завод кольорових металів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://res.ua/provid-pvs-2h4-zaporizkiy-zavod-kolorovih-metaliv.html?gclid=Cj0KCQjwof_QBhCgARIsADaMzOfLFoYrhniiqyZFdgCgeC9hnPWE0QVgyFt64n3BTiFZH_KN3KWG5OMaAspYEALw_wcB&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=23729129457-Performance_Max_kabelno_providnikova (дата звернення: 25.04.2026). – Назва з екрану.

32. Про затвердження Державних санітарних правил планування та забудови населених пунктів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0379-96#Text> (дата звернення: 7.05.2026). – Назва з екрану.

33. Агєєв Є.Я. Основи охорони праці : навчальний посібник / Є.Я. Агєєв. – 2-ге вид., стер. – Львів : Новий Світ-2000, 2026. – 270 с.

34. Кожушко Г.М. Світлотехніка та електроосвітлення : підручник. – Харків : ХНАДУ, 2012. – 360 с.

35. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення [чинний від 2019-03-01] / розроб.: ДП "Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій", ТОВ "Київпромелектропроект". – Вид. офіц. – Київ: Мінрегіон України, 2018. – 134 с.

36. Мазур Н.П. Ергономіка та безпека інформаційних технологій: навчальний посібник / Н.П. Мазур, М.В. Мазур. – Харків : ХНУРЕ, 2017. – 248 с.

ДОДАТОК А

Відомості щодо апробації кваліфікаційної роботи

Актуальні проблеми сучасної енергетики - 2026

УДК 621.311

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЛІТІЙ-ЗАЛІЗО-ФОСФАТНИХ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

Хайнус М.В., к.т.н., доц. Андронova О.В.

Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький

kev_ku@ukr.net

Науковий керівник: к.т.н., доц. Андронova О.В.

Впровадження резервних джерел живлення на сьогодні в Україні стало базовою потребою. Забезпечення енергонезалежності споживачів дає можливість функціонування в умовах аварійних та віялових відключень, що запроваджуються через регулярні атаки на критичну інфраструктуру. Для створення резервних джерел живлення найчастіше застосовують акумуляторні батареї на основі свинцево-кислотних або літій-залізо-фосфатних електрохімічних систем. Хоча свинцево-кислотні акумуляторні батареї характеризуються відносно низькою ціною, але за питомою енергією, терміном служби при роботі у циклічному режимі, допустимою глибиною розряду та ефективністю циклу заряду-розряду суттєву перевагу мають більш дорогі літій-залізо-фосфатні акумулятори. Техніко-економічне обґрунтування вибору електрохімічної системи акумуляторних батарей потребує визначення їх терміну експлуатації в заданих умовах функціонування.

В даній роботі визначено вплив умов експлуатації літій-залізо-фосфатних акумуляторів на темпи їх деградації. Моделювання проведено в програмному середовищі Matlab/Simulink (рис. 1).

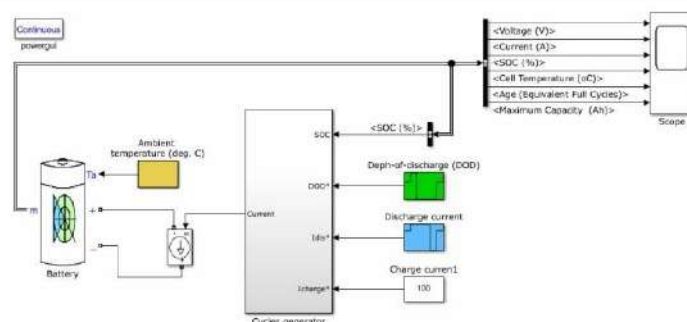


Рисунок 1 – Модель дослідження темпів деградації літій-іонної акумуляторної батареї

В блоці Battery введено параметри літій-залізо-фосфатної акумуляторної батареї EverExceed 48200-T ємністю 200 А·год, номінальною напругою 48 В. Акумулятор піддається циклуванню протягом 2000 годин при температурах навколишнього середовища t_a 25 °C та 40 °C, а також при різній глибині розряду (DOD) та швидкості розряду, що задається значенням розрядного

струму (табл. 1). Результати моделювання наведено на рис. 2.

Таблиця 1

Режими циклування										
$t, \times 10^6 \text{ c}$	0,00	0,72	1,44	2,16	2,88	3,60	4,32	5,04	5,76	6,48
$I_p, \text{ A}$	20			40	100	20			40	100
DOD, %	20	40	80				20	40	80	
$t_{as}, ^\circ\text{C}$	25					45				

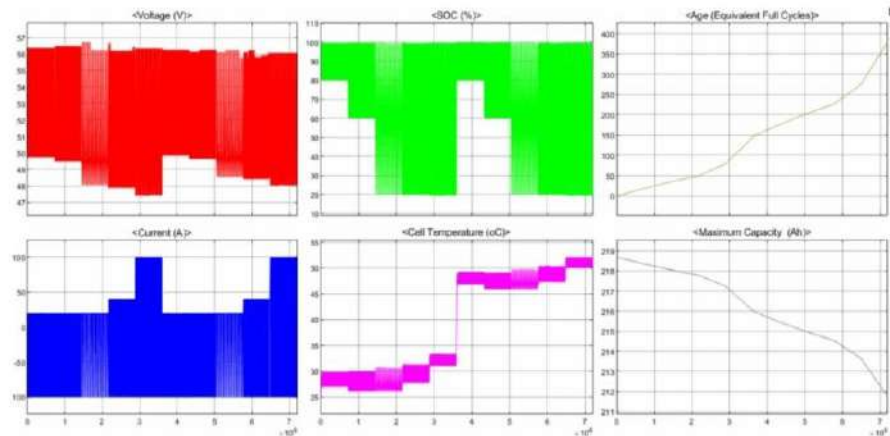


Рисунок 2 – Циклування літій-залізо-фосфатної акумуляторної батареї

Як видно з рис. 2, при розряджанні з малою швидкістю 0,1 C (струм 20 A) глибина розряду не суттєво впливає на темпи деградації. При температурі оточуючого середовища 25 °C акумуляторна батарея нагрівається до 28 °C і в такому режимі експлуатації за 200 год. термін її дії скорочується в середньому на 16 повних циклів заряду-розряду, тобто ємність зменшується на 0,14 %. Збільшення швидкості розряду до 0,5 C (струм 100 A) при DOD=80 % приводить до підвищення температури до 32 °C та втрати 0,54 % ємності за 200 год. експлуатації.

Експлуатація в умовах підвищених температур оточуючого середовища приводить до більш суттєвого розігріву акумуляторної батареї до 51 °C, а, отже, до збільшених темпів деградації. Так, при швидкості розряду 0,5 C за 200 год. роботи в режимі циклування на глибину 80 % втрачається 1,9 % ємності, тобто термін експлуатації зменшується на 105 циклів.

Проведене моделювання при температурі оточуючого середовища 0 °C показало з одного боку, зниження темпів деградації в 2 рази у порівнянні з експлуатацією при 25 °C, а, з іншого – зменшення ємності на 8 % через зниження швидкості протікання процесів розряду та заряду.

Отже, дослідження режимів роботи літій-залізо-фосфатної акумуляторної батареї показало, що найбільший вплив на ємність та темпи деградації чинять температурні умови роботи, які погіршуються при відхиленні температури оточуючого середовища від оптимального значення 20-25 °C або при розігріві акумуляторів в режимах циклування великими струмами.

ДОДАТОК Б

Визначення енергоспоживання об'єкта

Таблиця Б.1 – Потужності споживачів

№	Споживач	Потужність, Вт
1	Мікрохвильова піч	850 – 1500
2	Чайник	1200 – 1500
3	Холодильник	230 – 550
4	Посудомийна машина	2000 – 2500
5	Кавомолка	140 – 220
6	Тостер	800 -1500
7	Блендер	220 – 700
8	Кухонний комбайн	500 – 800
9	Кавоварка	150 – 3000
10	Телевізор	17 – 300
11	Комп'ютер	150 – 300
12	Кондиціонер	800 – 2500
13	Пилосос	700 – 2000
14	Фен	1200 – 1800
15	Пральна машина	700 – 2000
16	Праска	800 – 2400
17	Електроплита	1200 – 4000
18	Принтер	100 – 650
19	Копіювальний пристрій	2000 – 5000
20	Насос	250-500
21	Музичний центр	100
22	DVD-плеєр	35 – 60
23	Витяжка	100 – 150
24	Вентилятор	10 – 60
25	Електроковдра	40 – 100
26	Бритва	10 – 15
27	Обігрівач	1500 – 6000
28	Дриль	600 – 1000

ДОДАТОК В

Параметри компонентів фотоелектричної системи



Рисунок В.1 – Вигляд інвертора SUN-5K-SG01LP1-US

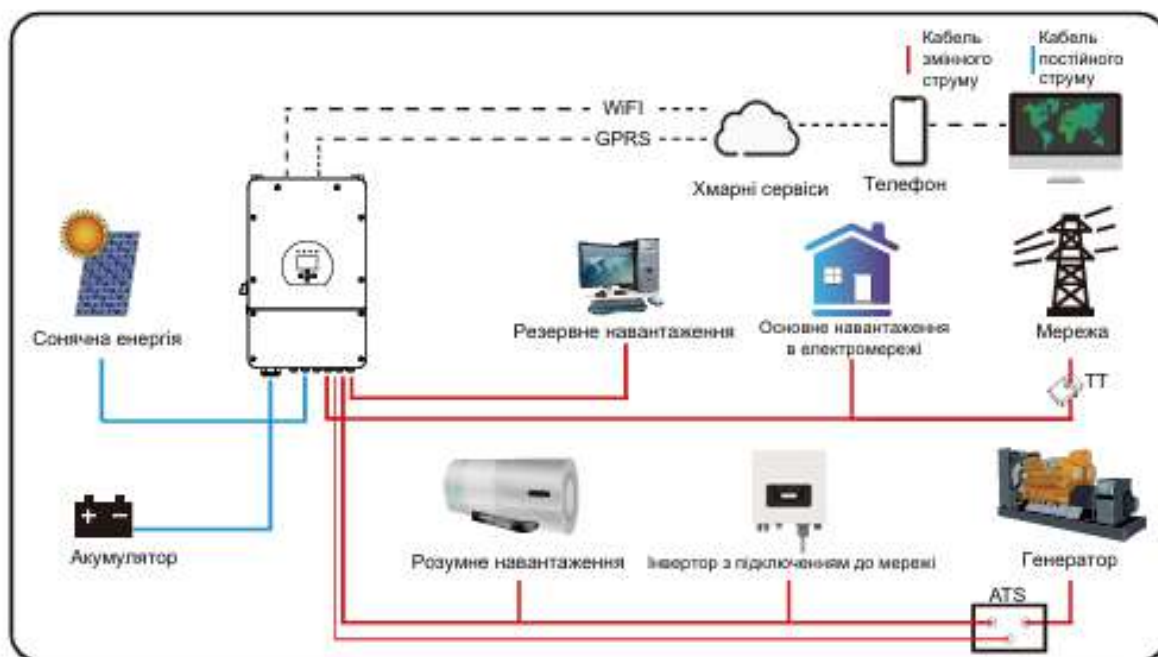


Рисунок В.2 – Схема підключення інвертора

Таблиця В.1 – Характеристики інвертора Deye

Модель	SUN-5K-SG01LP1-US
Вхід акумуляторних батарей	
Тип акумулятора	Свинцево-кислотні або літій-іонні
Діапазон напруги акумулятора (В)	40-60
Максимальний зарядний струм (А)	120
Максимальний розрядний струм (А)	120
Крива зарядки	3 етапи / Вирівнювання
Зовнішній датчик температури	Наявний
Спосіб заряджання літій-іонного акумулятора	Самоадаптація до BMS
Вхід масиву фотоелектричних модулів	
Максимальна вхідна потужність постійного струму (Вт)	6500
Вхідна напруга ФЕМ (В)	370 (125~500)
Діапазон МРРТ (В)	150~425
Пускова напруга (В)	125
Номинальний струм (А)	13+13
Максимальний струм (А)	20+20
Кількість трекерів МРРТ	2
Вихідні дані змінного струму	
Номинальна вихідна потужність (Вт)	5000
Максимальна вихідна потужність (Вт)	5500
Пікова потужність (без мережі)	2 рази від номінальної потужності, 10 с
Вихідний номінальний струм (А)	20.8/24
Максимальний струм (А)	22.9/26.4
Максимальний тривалий прохідний струм (А)	40
Коефіцієнт потужності	від 0,8 випередження до 0,8 відставання
Вихідна частота та напруга	50 / 60 Гц; 220/230 В
Тип мережі	однофазна
Загальний коефіцієнт гармонік (THD)	<3% (від номінальної потужності)
Ефективність	
Максимальна ефективність	97.60%
Євро ефективність	97.00%
Ефективність МРРТ	>99%
Захист	
Інтегрований	Виявлення несправностей PV-дуги, від перенапруги на стороні постійного струму, від острівців, від зворотної полярності підключення груп модулів, контроль опору ізоляції, моніторинг струму витоку, захист від перевищення вихідного струму, від перенапруги на стороні змінного струму
Ступінь захисту	IP65
Діапазон робочих температур, °C	-40° ~ + 60°



Рисунок В.3 – Вигляд акумуляторної батареї Deye SE-F12

Таблиця В.2 – Характеристика акумуляторної батареї Deye

Модель		SE-F12
Хімічний склад акумулятора		LiFePO ₄
Ємність (А·год)		230
Масштабованість		32 шт. паралельно
Номінальна напруга (В)		51.2
Робоча напруга (В)		44.8~57.6
Номінальна енергія (кВт·год)		11.8
Система захисту		Вбудована BMS
Струм заряду (А)	Максимально безперервний	230
	Піковий	280 (10 сек)
Струм розряду (А)	Максимально безперервний	230
	Піковий	280 (10 сек)
Рекомендована глибина розряду		90%
Термін служби		≥6000 (25°C±2°C, 70% EOL·)

·EOL - End of Life, кінець терміну служби для акумуляторів визначається, коли ємність падає до 70% від початкової

Таблиця В.3 – Характеристики фотоелектричного модуля Longi

Модуль	LR5-54НІН-400М
Умови тестування	STC AM1,5; 1000 Вт/м ²
Максимальна потужність ($P_{\max}$, Вт)	400
Напруга холостого ходу (V_{oc} , В)	36.75
Струм короткого замикання (I_{sc} , А)	13.76
Напруга в точці максимальної потужності (V_{mpp} , В)	30.75
Струм в точці максимальної потужності (I_{mpp} , А)	13.01
ККД, %	20.5
Температурний коефіцієнт струму короткого замикання (I_{sc})	+0.050%/°C
Температурний коефіцієнт напруги холостого ходу (V_{oc})	-0.265%/°C
Температурний коефіцієнт потужності ($P_{\max}$)	-0.340%/°C
Максимальна напруга системи В	DC 1500 V
Робоча температура	-40°C ~ +85°C
Розміри	1722×1134×30 мм

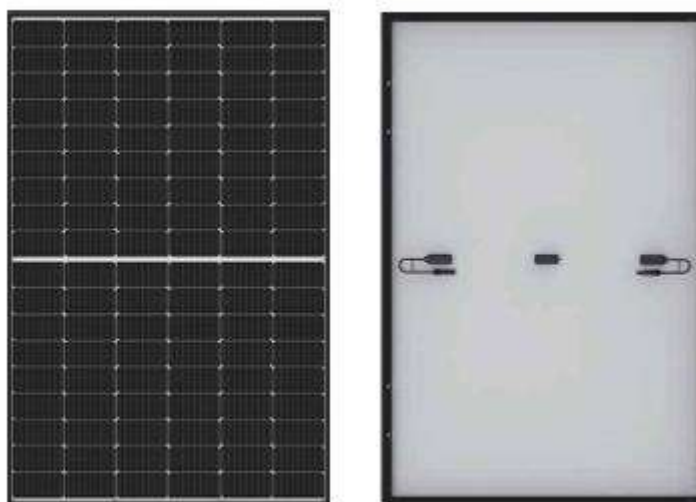


Рисунок В.4 – Фотоелектричний модуль Longi LR5-54НІН-400М

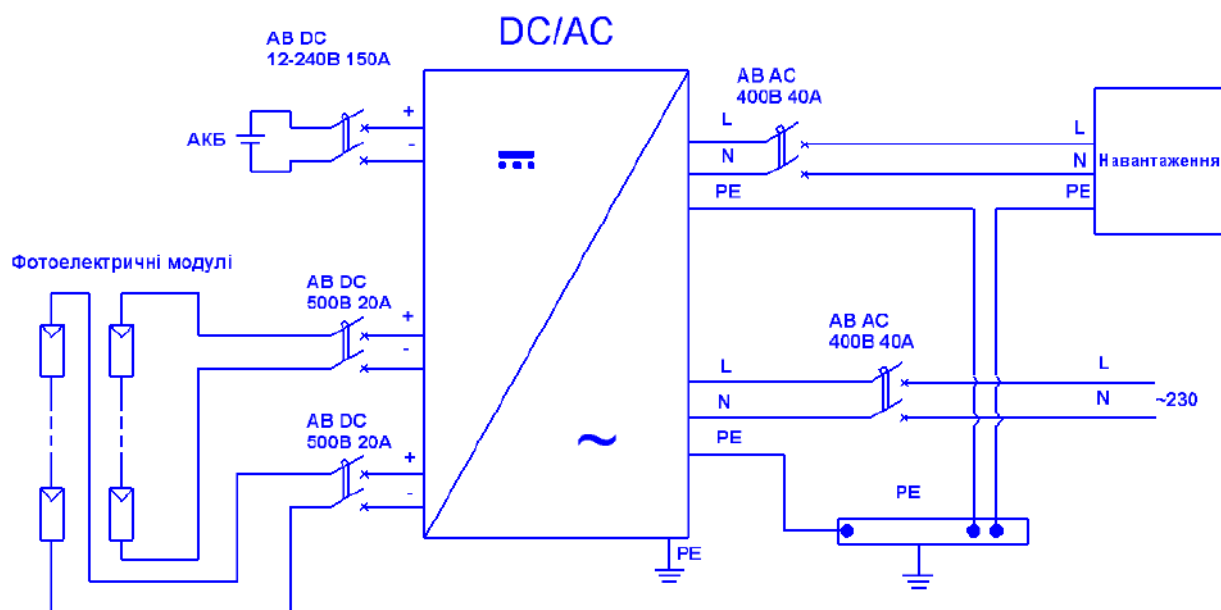
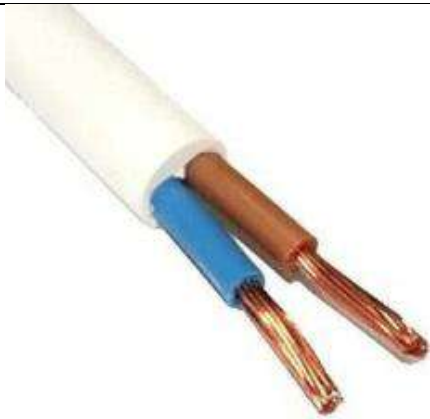


Рисунок В.5 – Схема гібридної фотоелектричної системи

Таблиця В.4 - Автоматичні вимикачі та кабельна продукція

Автоматичний вимикач	Кабель
Підключення акумулятора	
 DC 150A 2P PV 6Ka	 35 мм² 600 V HYBSZ
Підключення ФЕП	
 CHINT NB1-63DC 2P C20 DC500V 20A 6kA	 H1Z2Z2-K 4 мм²

Продовження таблиці В.4

Підключення до мережі та навантаження	
 A white Schneider R9F12240 Mini Circuit Breaker (MCB) with two poles. The top has two screw terminals for incoming wires, and the bottom has two screw terminals for outgoing wires. The front panel has two toggle switches, both in the 'O.OFF' position. The Schneider logo and model number are visible.	 A white PVC-insulated cable with two conductors: a blue one and a brown one. The ends of the conductors are stripped, showing the copper strands.
R9F12240	ПВС 2x4