

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Навчально-науковий інститут інженерії та технологій
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) О. КОЛЛАРОВ (ініціали, прізвище) «___» 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
БАКАЛАВРА

на тему Розробка автономної фотоелектричної станції промислового підприємства

Виконав студент 4 курсу, групи ЕЛК-21
(шифр групи)

спеціальності підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та та електромеханіка»
(шифр і назва спеціальності підготовки)

Дамір БАДРЕТДІНОВ (ім'я та прізвище)	 (підпис)
---	--

Керівник зав. каф. ЕлІн, к.т.н., доц. О. Ю. КОЛЛАРОВ (посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)	 (підпис)
--	--

Рецензент (посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)	 (підпис)
---	--

Нормоконтроль:

Е. НЕМЦЕВ (підпис)

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

Студент	 (підпис)
---------	--

(дата)

(дата)

ДРОГОБИЧ – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Навчально-науковий інститут інженерії та технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

« » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Даміру БАДРЕТДІНОВУ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Розробка автономної фотоелектричної станції
промислового підприємства

керівник роботи Олександр КОЛЛАРОВ, к.т.н., доц
(ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 10 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: Максимальна потужність навантаження всіх
споживачів промислового підприємства – 300 кВА. Територіальне
розташування підприємства - місто Дрогобич Львівської області. Реактивна
частка навантаження складає третину від повного навантаження всіх
споживачів.

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

1. Огляд сучасних підходів до розробки та проектування фотоелектричних станцій промислових об'єктів.

2. Розрахунок основних компонентів фотоелектричної станції (інвертор, зарядний пристрій, фотоелектричні панелі, роз'єднувачі та вимикачі, акумулятори, тощо).

3. Вибір основних компонентів фотоелектричної станції на підставі виконаного розрахунку (інвертор, зарядний пристрій, фотоелектричні панелі, роз'єднувачі та вимикачі, акумулятори, тощо).

4. Математичне моделювання роботи розробленої фотоелектричної станції в автономному режимі при змінюванні навантаження

5. Огляд питань безпечної експлуатації основних елементів фотоелектричних станцій.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)
Одинадцять слайдів презентаційного матеріалу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1–5	О. Ю. Колларов, зав. каф.		
Нормоконтроль	Е. М. Нємцев, ст. викл. каф.		

7. Дата видачі завдання 28 квітня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	28.04–05.05.25	
2.	Розділ 2	06.05–13.05.25	
3.	Розділ 3	14.05–21.05.25	
4.	Розділ 4	25.05–30.05.25	
5.	Розділ 5	31.05–10.06.25	
6.			
7.			
8.			
9.			

Студент _____
(підпис)

Дамір БАДРЕТДІНОВ
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Олександр КОЛЛАРОВ
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Дамір БАДРЕТДІНОВ. Розробка автономної фотоелектричної станції промислового підприємства / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Дрогобич, 2025.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків, переліку джерел посилання та двох додатків.

У першому розділі був проведений огляд сучасних підходів до розробки та проектування фотоелектричних станцій, розглянуті етапи та особливості проектування сонячних електростанцій, вивчені конфігурації розміщення панелей.

У другому розділі розраховане навантаження підприємства, що розглядається методом коефіцієнту попиту, отриманий графік навантаження підприємства, графік генерації електроенергії на місцевості, графік заряду розряду акумуляторних батарей.

У третьому розділі проведений вибір основних компонентів фотоелектричної станції: панелі, акумулятори, інвертори, автомати та роз'єднувачі, кабельне обладнання, обрана компенсаційна установка для зменшення реактивної складової потужності.

У четвертому розділі проведено математичне моделювання та представлені результати дослідження автономної фотоелектричної станції в програмному пакеті Matlab.

Ключові слова: фотоелектричний модуль, відновлювані джерела енергії, акумуляторна батарея, сонячна радіація, інвертор, потужність, Simulink, Matlab, точка максимальної потужності

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	7
1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО РОЗРОБКИ ТА ПРОЄКТУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ	8
1.1 Правила та основи проектування фотоелектричних станцій	8
1.1.1 Етапи проектування сонячних електростанцій	8
1.2 Спрощений підхід до розробки автономних систем	12
1.3 Розміщення фотоелектричних панелей	18
1.3.1 Цілі обґрунтування розміщення фотоелектричних панелей	18
1.3.2 Панелі, встановлені на даху	21
2 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ КОМПОНЕНТІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ	25
3 ВИБІР ОСНОВНИХ КОМПОНЕНТІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ НА ПІДСТАВІ ВИКОНАНОГО РОЗРАХУНКУ	34
3.1 Вибір фотоелектричних панелей	34
3.2 Акумулятори	38
3.3 Інвертор	42
3.4 Вибір автоматів і роз'єднувачів	43
3.5 Вибір кабельного обладнання	44
3.6 Вибір компенсуючих пристроїв	45
4 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ РОЗРОБЛЕНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ В АВТОНОМНОМУ РЕЖИМІ ПРИ ЗМІНЮВАННІ НАВАНТАЖЕННЯ	47
4.1 Структура фотоелектричного елемента	47
4.2 Алгоритми відстежування точки максимальної потужності	50
4.3 Математична модель у Matlab/Simulink	52
ВИСНОВКИ	55
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	56

ДОДАТОК А. Огляд питань безпечної експлуатації основних елементів фотоелектричних станцій	57
ДОДАТОК Б. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	59

ВСТУП

У зв'язку із війною спровокованою рф власників підприємств та бізнесу спіткають проблеми блекаутів і постійне зростання тарифів для юридичних осіб. За прогнозом Міністерства економічного розвитку і торгівлі, ціна на електричну енергію для побутових споживачів зростатиме щорічно. Фотоелектрична станція дозволяє досягти значного зниження поточних витрат на електроенергію та підвищити рентабельність підприємства. Частину енергії, яка споживається виробничими потужностями буде отримано від власної сонячної електростанції, таким чином, вона не буде споживатися з мережі. Також, сонячна електростанція (СЕС) дозволить «згладити» піки споживання, чим дасть змогу уникнути додаткових витрат у вигляді штрафів за перевищення максимально допустимих лімітів потужності споживання.

За принципом дії СЕС для підприємств, що працює на власні потреби і установка, розрахована на продаж електричної енергії за зеленим тарифом, мають деякі відмінності. Що у першому, що у другому випадку фотоелектричні панелі перетворюють енергію сонячного світла в постійний струм, а інвертор перетворює постійний струм у змінний та. З одним лише винятком – об'єкт, що працює за Зеленим тарифом створює перетікання електроенергії в загальну мережу, в разі ж роботи СЕС на власні потреби цього перетоку не відбувається. Справа в принципі реалізації виробленої енергії за Зеленим тарифом. Оплачується саме перетікання в зовнішню мережу, яке відбувається після повного забезпечення енергією навантажень, яка враховується спеціальним двонаправленим лічильником.

1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО РОЗРОБКИ ТА ПРОЄКТУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

1.1 Правила та основи проектування фотоелектричних станцій

Проектування сонячних електростанцій – важливий етап, правильність виконання якого визначає всю подальшу роботу системи. Через це виконувати відповідні роботи повинні виключно фахівці, які мають відповідну освіту, кваліфікацію та досвід. У наш час створення комп'ютерної моделі дозволяє в повній мірі оцінити майбутню конструкцію, а також різні варіанти її розміщення на території замовника.

Розрахунок головних параметрів проводиться, з урахуванням характеристики конкретного обладнання особливу увагу звертаючи на властиві йому режими та можливі варіанти аналогів

1.1.1 Етапи проектування сонячних електростанцій

Проектування фотоелектричної станції передбачає виконання кількох кроків:

1) Виконання передпроектних робіт та інженерних рішень

На цьому етапі підраховується ризики, і визначається період часу необхідні для повного завершення проєкту.

Важливо мати на увазі, що у випадку самовільного встановлення обладнання на дах, стіни чи інші несучі конструкції наслідком може стати пошкодження цих самих конструкцій, а також встановленого обладнання.

2) Передпроектне моделювання

Проведення складних розрахунків, з урахуванням багатьох факторів, потребує проведення попереднього комп'ютерного моделювання. Воно вимагає

застосування розрахунків у спеціалізованому програмну забезпеченні, що згодом дозволяє зменшити витрати замовника, і підвищити прибутки за рахунок оптимізації ресурсів на виконання проекту.

Проекти фотоелектричних електростанцій допускають введення великої кількості змінних в систему. Такий підхід дає змогу одночасно враховувати багато різних факторів. На даному етапі розрахунки, виконані за допомогою комп'ютерних засобів, піддаються ретельному аналізу. Як результат, отримані дані стають основою для підбору обладнання, розташування та способу монтажу обладнання СЕС.

3) Техніко-економічне обґрунтування проекту

Техніко-економічне обґрунтування (ТЕО) – це оцінка доцільності впровадження запропонованого проекту. Дослідження має на меті виявлення потенційних проблем і перешкод, що можуть постати при реалізації проекту. У документі міститься аналіз витрат і результатів, що дає змогу інвесторам зробити висновок про те, чи варто робити інвестиції у реалізацію даного плану.

ТЕО великих промислових СЕС, зазвичай, складається з наступних розділів:

1. Вихідні положення, що визначають технічну та економічну можливість будівництва об'єкта.
2. Обґрунтування потужності СЕС та передбачуваної кількості виробництва електричної енергії.
3. Обґрунтування чисельності та складу виробничого персоналу.
4. Забезпечення основними матеріалами, енергетичними та трудовими ресурсами.
5. Інженерні винаходи.
6. Схеми генерального плану, транспорту, інженерних мереж.
7. Оцінка впливу на екологію.
8. Заходи щодо інженерної підготовки території з метою захисту від небезпечних техногенних або природних факторів.
9. Основні технологічні, планувальні та будівельні рішення.

10. Наявність точок та технічних умов для підключення генеруючого об'єкта до електричних мереж.
11. Вибір місця розташування та способу встановлення.
12. Рекомендації з обладнання – сонячним панелям, інверторам, акумуляторним батареям (якщо застосовані) і конструкціям, що підтримують.
13. Оцінка енергоефективності.
14. Трансформаторні підстанції.
15. Техніко-економічні показники.
16. Організація будівництва та охорона праці.
17. Вибір певного варіанта із запропонованих рішень.
18. Визначення вартості, кошторисна документація.
19. Визначення класу наслідків.

У межах ТЕО перед керівниками постає питання визначення наявності в них достатньої кількості людей, фінансових ресурсів і відповідних технологій для впровадження цього проекту.

4) Техніко-економічний розрахунок

Проекти сонячних електростанцій в Україні передбачають виконання техніко-економічного розрахунку.

Проектування сонячних електростанцій найчастіше передбачає виконання техніко-економічного розрахунку (ТЕР). Його розробка потребує завдання на проектування та детальні вихідні дані. Глибину дослідження визначає масштаб проекту, потенційні проблеми та вимоги зацікавлених сторін. Навіть для автономної сонячної електростанції корисно визначити, чи буде вона забезпечувати потреби мешканців в енергії.

ТЕР проводиться для технічно нескладних виробничих об'єктів. Для невеликих СЕС цей процес може бути відносно простим, для потужних – складнішим та трудомістким.

Ця робота включає:

- огляд та вибір місця розташування майбутньої установки;
- попередній вибір обладнання;

– проведення основних оцінок генерації електроенергії.

У дослідженні також має бути визначена окупність інвестицій та проведений економічний аналіз.

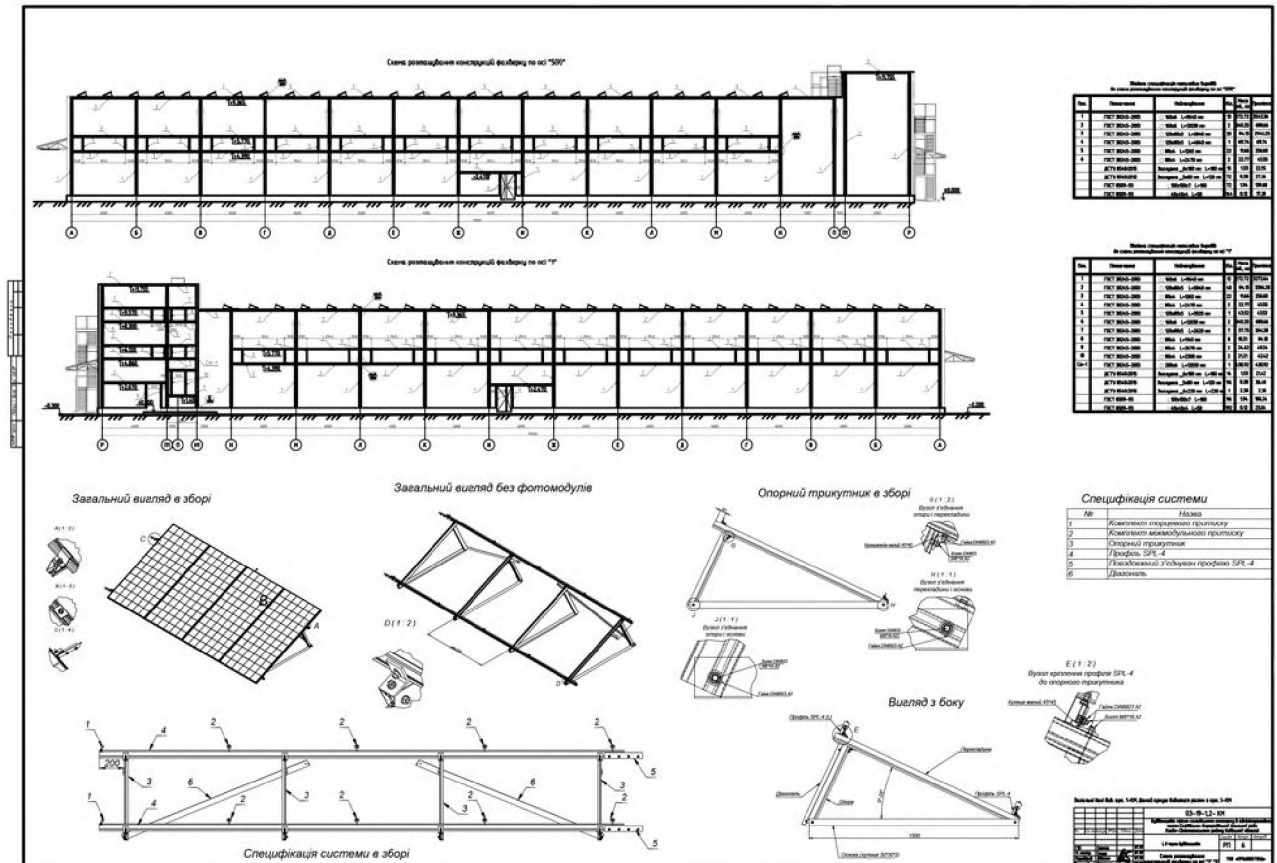


Рисунок 1.1 – Приклад вигляду креслення проєкту ФЕС

Важливі кроки у створенні успішного проєкту СЕС:

1) Виявлення перешкод на старті фази планування. Результати проведення ТЕО та ТЕР показують, чи є об'єкт життєздатним за фінансовими та технологічними показниками.

2) Врахування багатьох важливих і специфічних факторів, таких як розташування об'єкта, планування майданчика, близькість до комунальних підприємств, зберігання енергії тощо.

3) Базове розуміння про вартість проєкту, проблеми з підключенням, сумісність сонячного обладнання, дозволи та погодження.

Після виявлення перешкод переважна кількість обмежень може бути ефективно подолана шляхом ефективного планування. Не провівши ретельного аналізу будівництво СЕС, найімовірніше, вийде за рамки бюджету або ж зупиниться.

Детальний і точний розрахунок (обґрунтування) є основою для успішного проєкту встановлення сонячної електростанції. У компаніях, що професійно займаються промисловими сонячними електростанціями працює низка фахівців, які мають ліцензії та досвід проведення ТЕО та ТЕР проєктів сонячних електростанцій на всій території України.

Проектування мають виконуватись відповідно до вимог:

ДБН А.2.2-3:2014 Склад та зміст проєктної документації на будівництво.

ДСТУ 8855:2019 Будівлі та споруди. Визначення класу наслідків (відповідальності)

Кошторисні норми України. Настанова з визначення вартості будівництва.

Закону України «Про регулювання містобудівної діяльності» та іншими нормами і правилами.

1.2 Спрощений підхід до розробки автономних систем

У цьому підрозділі ми розглянемо необхідні кроки для створення автономної системи, загальний вигляд якої зображено на рисунку 1.2[5].

Такий підхід можна описати в наступні шість кроків:

- визначити графік навантаження підприємства;
- визначити сонячне опромінення на місцевості;
- вирахувати втрати в системі;
- визначити оптимальне положення модуля для сонячної батареї;
- розрахувати ємність батареї для рекомендованого часу резерву;
- вибрати відповідні додаткові пристрої (інвертор, контролер зарядку тощо).

Тепер розглянемо ці кроки більш детально.

1. Визначення графіку навантаження підприємства

Це ключовий етап, який визначає, скільки електроенергії споживає підприємство протягом доби. До нього входить:

- проведення енергетичного аудиту споживання електроенергії;
- вимірювання або збирання даних про добове навантаження;
- визначення пікових годин споживання, базового навантаження та тривалість його дії;
- визначення навантаження за типами споживачів (освітлення, виробниче обладнання тощо);
- оцінка критичного навантаження, яке потребує безперебійного живлення.

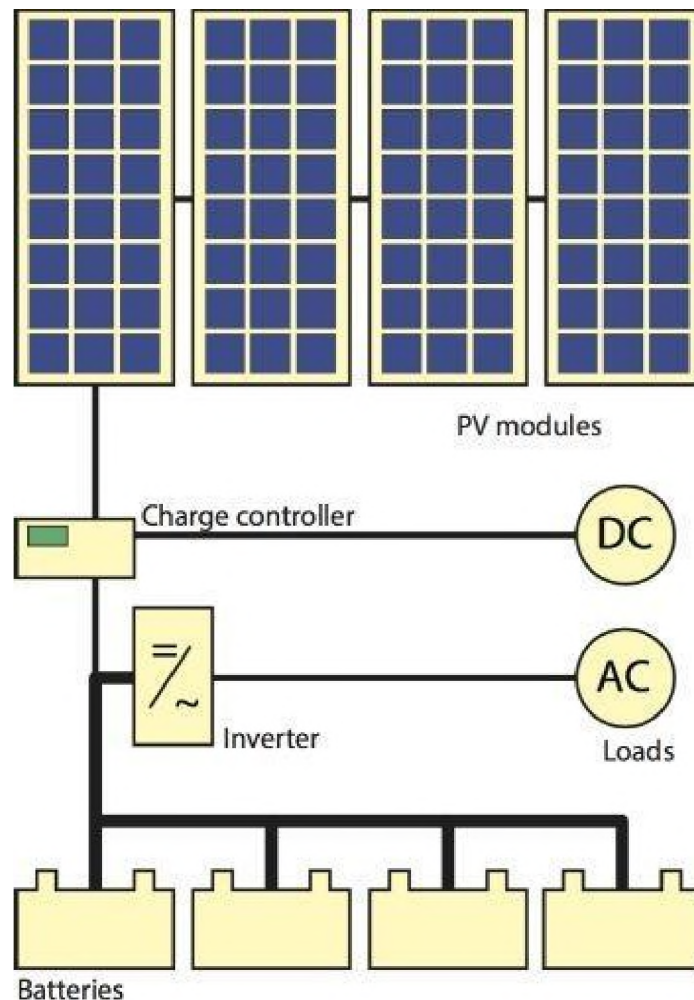


Рисунок 1.2 – Зображення автономної фотоелектричної системи з навантаженнями змінного та постійного струму

У результаті отримуємо графік навантаження, а також середнє та пікове споживання.

2. Визначення сонячного опромінення на місцевості

Сонячна інсоляція визначає обсяг потенційної генерації електроенергії, таким чином потрібно:

- отримати дані про сонячну радіацію (кількість сонячних годин, кВт·год/м²/день) використовуючи джерела з певного переліку, як то: NASA POWER, PVGIS, Meteonorm або місцеву метеостанцію;
- врахувати сезонні зміни інсоляції;
- побудувати графік середньої добової генерації на основі опромінення.

У результаті отримуємо таблицю/графік з даними по місяцях – середнє добове опромінення в кВт·год/м²/день.

3. Визначення втрат в системі

Втрати враховують реальну ефективність системи. До основних джерел втрат відносять:

- пил та забруднення модулів: 2–5%;
- невідповідність параметрів модулів: 1–3%;
- кабельні втрати: 1–2%;
- температурні втрати: 3–8%;
- втрати в інверторі: 2–5%;
- втрати в контролері заряду: 1–2%.

Формула для визначення енергії, яка може бути використана споживачами:

$$E_{\text{факт}} = E_{\text{теор}} \cdot \eta$$

де η – загальний коефіцієнт ефективності, на основі сумарних втрат в системі.

4. Визначення оптимального положення фотоелектричного модуля

Для визначення положення панелі ми відштовхуємось від таких параметрів:

- азимут (кут повороту): для північної півкулі найчастіше – південь (180°)[7];
- кут нахилу: залежить від широти місцевості.

Відповідно до цього визначаємо географічну широту об'єкта.

Розраховуємо оптимальний кут нахилу знаючи, що для максимального виробітку за рік[6]:

- кут $\approx$ широта,
для зимового періоду:
- кут $\approx$ широта + $10\text{--}15^\circ$.
для літнього:
- кут $\approx$ широта – $10\text{--}15^\circ$.

Результат: Рекомендований фіксований або динамічний кут встановлення з можливістю сезонного регулювання.

5. Розрахунок ємності батареї для рекомендованого часу резерву

Відштовхуючись від відомих даних про загальне добове споживання, - бажаний період автономної роботи, тип задіяних акумуляторів (LiFePO₄, GEL, AGM), допустиму глибину розряду (DOD) визначається необхідна ємність батареї за наступною формулою:

$$E_{ак} = \frac{E_{доб} \cdot N}{\sigma \cdot \eta}, \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

де $E_{доб}$ – добове споживання кВт·год,

N – дні резерву,

σ – глибина розряду,

η – ефективність системи збереження.

6. Вибір додаткових пристроїв

1. Контролер заряду

Призначений для регулювання подачі електроенергії від сонячних панелей до акумуляторів. Він запобігає перезарядженню акумуляторів, не допускає глибокого розряду (особливо стосується PWM типів), забезпечує оптимальну зарядку, подовжуючи термін служби батарей.[8]

Контролери на ШІМ (широтно-імпульсній модуляції) дешевші, простіші, нижчий ККД (до 75–80%) працюють тільки при відповідності напруги панелей до напруги батарей.

Контролери з відстежуванням точки максимальної потужності MPPT (Maximum Power Point Tracking) порівняно з попередніми мають більший коефіцієнт корисної дії (до 95–99%), автоматично адаптуються до змінної напруги/струму від сонячних панелей, мають більшу вартість, проте ефективніші – особливо в холодну пору року в умовах хмарності та затінення.

При виборі контролера необхідно враховувати максимальну напругу фотоелектричного масиву, максимальний струм заряду, сумісність з акумуляторним типом, наявність протоколів зв'язку для моніторингу (RS485, Bluetooth тощо).

2. Інвертор

Призначений для перетворення постійного струму з акумуляторів/панелей на змінний струм для живлення обладнання.

До основних функцій інверторів відноситься перетворення напруги постійного струму у напругу змінного струму, забезпечення безперервного живлення критичних навантажень, у гібридних моделях — автоматичне

перемикання між різними джерелами (панелі, генератор, мережа), часто може мати вбудований зарядний пристрій для батарей.

Існує декілька типів інверторів за призначенням: автономні, як працюють лише з акумуляторами, без можливості роботи з мережею.

Гібридні, які працюють з кількома джерелами, включаючи сонячні панелі, акумулятори, загальна електрична мережа, різного типу генератори.

Мережеві – тільки для роботи з мережею та не використовуються в автономних системах.

Вибираючи інвертор необхідно звертати увагу на потужність пристрою, вона повинна відповідати піковому навантаженню з запасом 20–30%. Форму вихідної синусоїди – це може бути чиста — для більшості обладнання або модифікована — лише для простих, невимогливих приладів.

У великих системах також важливо, щоб інвертор мав можливість паралельного підключення (підтримував масштабованість). При наявності критичних навантажень має місце потреба у як найнижчому часі перемикання (<20 мс для критичних навантажень).

3. Захисне обладнання

Захищає компоненти станції від перевантажень, коротких замикань, перенапруги, блискавки, перегріву тощо. До таких пристроїв відносяться автоматичні вимикачі, запобіжники, роз'єднувачі, блискавкозахист, заземлення, моніторингові системи.

1) Автоматичні вимикачі (автомати):

Захищають кола змінного і постійного струму від перевантаження та короткого замикання. Встановлюються перед інвертором, після контролера, на кожній гілці панелей.

2) Запобіжники

Зазвичай використовуються в колах акумуляторних батарей.

Вони відключають лінію при перевищенні допустимого струму.

3) Роз'єднувачі постійного та змінного струму:

Дозволяють фізично роз'єднати певні компоненти (наприклад, для обслуговування) є обов'язковими для організації безпечної роботи.

4) Блискавкозахист

Захищає обладнання від імпульсних перенапруг, викликаних блискавками або сплесками в мережі, встановлюється на вході та виході інвертора, перед контролером.

5) Заземлення:

Уся система (панелі, корпуси інвертора, акумуляторів) має бути заземлена, це забезпечує безпеку персоналу та зменшує ризик пошкодження від блискавки.

6) Моніторингові системи:

Дозволяють відстежувати параметри роботи: напруга, струм, заряд, температуру, статуси, часто зустрічаються інтегрованими в контролер або інвертор.

1.3 Розміщення фотоелектричних панелей

1.3.1 Цілі обґрунтування розміщення фотоелектричних панелей

Від місця розташування фотоелектричних панелей залежить вартість деталей і робіт, їх складність, простота доступу та обслуговування, естетичність вигляду. Загалом можна сформулювати такі цілі проектування системи кріплення фотоелектричних панелей:

- мінімізувати витрати на встановлення;
- підвищити продуктивність масиву;
- забезпечити розумний доступ для встановлення та обслуговування;
- зробити систему естетично відповідною до місця розташування та застосування.

Окремо розглянемо кожну ціль.

1. Мінімізація витрат на встановлення

Для зменшення витрат на встановлення можна використовувати як якісне проектування, так і належну практику монтажу. Проведені дослідження показали, що лише близько половини вартості фотоелектричних систем припадає на модулі. Інша половина припадає на немодульні компоненти і робочу силу, причому робоча сила є основною складовою. Вигода від зменшення кількості годин на встановлення має бути очевидною.[1]

Виробники фотоелектричних систем та постачальники систем можуть зменшити витрати на встановлення, виконавши одну або декілька з наступних дій:

- розробка упакованих комплектів;
- мінімізація загальної кількості деталей;
- мінімізація варіацій деталей;
- проектування багатофункціональних деталей;
- проектування деталей для багаторазового використання;
- проектування для простоти складання;
- уникнення окремих кріплень;
- мінімізація напрямку складання;
- максимізація відповідності при складанні;
- мінімізація маніпуляцій при складанні та встановленні.

2. Підвищення продуктивності фотоелектричної системи

Механічна система може впливати на продуктивність масиву декількома способами:

- збільшення кількості падаючого сонячного випромінювання;
- уникнення затінення;
- дозволяє масиву працювати при більш низьких температурах фотоелементів.

1) Збільшення освітленості панелей

Посилення випромінювання може бути досягнуто шляхом оптимізації орієнтації масиву, відстеження сонця та використання концентруючих

колекторів. Оптимальна орієнтація масиву залежить від типу системи, застосування та кінцевого користувача. Наприклад, для максимізації річного виробництва енергії оптимальний кут нахилу становить близько 90% від широти місця розташування, а оптимальний азимут – істинний південь для північної півкулі і істинна північ для південної півкулі.

Однак, енергетичні компанії можуть бути більш зацікавлені у зниженні пікового навантаження, ніж у загальному обсязі виробленої енергії. Отже, оптимальний кут азимуту може спрямовувати масив ближче на захід, ніж на південь (у Північній півкулі), оскільки пікові навантаження зазвичай припадають на літній полудень. Концентруючі та відстежуючі решітки найкраще працюють в районах з вищим за середній відсотком прямого випромінювання. При проектуванні інженер повинен зважити всі компроміси.

2) Затінення

Тісно пов'язане з підвищенням освітленості – необхідність уникати затінення. Експлуатаційні характеристики затінених масивів різняться, але на фотоелектричні масиви затінення зазвичай впливає сильніше, ніж на сонячні теплові колектори. Отже, затінення слід уникати в максимально можливій мірі.

3) Охолодження масиву

Фотоелектричні модулі, особливо ті, що використовують товсті кристалічні фотоелементи, краще працюють при нижчих робочих температурах фотоелементів. Отже, монтаж масиву повинен бути спроектований таким чином, щоб забезпечити циркуляцію повітря вздовж задньої поверхні модулів. Масиви, встановлені в стійку, зазвичай працюють при нижчих температурах, ніж інші конфігурації. Експерименти, проведені в Sandia National Laboratories, показують, що робочі температури масивів, змонтованих безпосередньо, можуть бути на 18°C вищими за номінальну робочу температуру комірки (NOCT). Для масивів, що монтуються окремо, висота від 10 до 15 см, без значних перешкод для повітряного потоку, забезпечить достатнє пасивне охолодження модулів.

Загалом, вихідна потужність тонкоплівкових матеріалів менше погіршується при високій робочій температурі комірок.

1.3.2 Панелі, встановлені на даху

Монтаж фотоелектричних масивів можна класифікувати залежно від того, де встановлюються масиви, як вони підтримуються, і чи мають вони фіксовану або змінну орієнтацію. Масиви можуть бути як даховими, так і наземними. Масиви, встановлені на даху, зазвичай використовують один з чотирьох різних способів опори: рамковий, стійковий, інтегрований або прямого кріплення до даху. Зі сплеском інтересу до фотоелектричних систем та дахових застосувань, розробляються кращі конструкції для кожного з цих чотирьох підходів до монтажу на даху.



Рисунок 1.3 – Стійковий монтаж забезпечує достатню висоту, що сприяє хорошій циркуляції повітря під панелями

Монтаж на прямих стійках

При монтажі на стійках масиви монтуються над поверхнею даху і паралельно їй, як показано на рисунку 1.3. Стійковий монтаж добре підходить

для будівель з похилими дахами. При встановленні автономної станції фотоелектричні панелі часто кріпляться до даху за допомогою точкових з'єднань – зазвичай на кутах панелей. Мінімально необхідна, висота між дахом і нижньою частиною рами модуля повинна бути не менше 8 см, але краще від 10 до 15 см.

Для сприяння пасивному охолодженню закріплених на стійках панелей, проектувальник повинен розглянути наступні конфігурації:

- конструкції, що забезпечують як бічний, так і вертикальний потік повітря вздовж задньої поверхні модулів;
- конструкції, які створюють різницю тисків між областями входу та виходу повітря;
- масиви з більшими поперечними розмірами, ніж вертикальними (тобто з більшим співвідношенням сторін).



Рисунок 1.4 – Приклад кріплення рам на даху в зоні вітрів високої швидкості

Монтаж на рамку

Масиви, що монтуються на раму, розташовуються на даху і нахилені по відношенню до нього, як показано на рис. 1.4. Рамкове кріплення добре працює на плоских дахах і дахах з ухилом 2 до 12 градусів або менше. Вони можуть бути механічно прикріплені до конструкції будівлі або використовувати баласт для

захисту від вітру та інших механічних навантажень. Рамкові кріплення зазвичай піддаються більшим навантаженням на конструкцію, вимагають більших витрат на монтажну фурнітуру і часто менш привабливі, ніж стійкові. Проте при однаковій площі масиву загальний вихід енергії часто вищий завдяки кращій орієнтації та нижчій середній робочій температурі.

Баластні стелажі мають явні переваги простоти і уникнення проколів даху. Однак більшість кріплень для рам міцно прикріплені до підконструкції даху. Зазвичай це точкові з'єднання, хоча іноді використовуються кілька розподілених методів кріплення. Панелі розміщені на рамах, як правило, працюють відносно холодно порівняно з іншими кріпленнями, і вони можуть зменшити тепловтрати через дах. Оскільки основним механізмом охолодження стійкового масиву є конвекція з передньої і задньої поверхонь модулів, охолодження іноді можна покращити, розташувавши стійку в природних повітряних каналах і зменшивши перешкоди на шляху повітряного потоку, такі як екрани, решітки та стіни.



Рисунок 1.5 – Фотоелектричні плитки замінюють традиційну покрівельну черепицю

Інтегровані модулі

Інтегровані модулі замінюють традиційні покрівельні або скляні матеріали, як показано на рисунку 1.5. Оскільки інтегровані елементи замінюють звичайні покрівельні та скляні матеріали, вони стають важливим архітектурним елементом будівлі і можуть мати дуже привабливий вигляд. Такий тип розміщення зазвичай використовується в приватних будинках.

Пряме кріплення

При прямому кріпленні панель закріплюється безпосередньо на покрівельному матеріалі або підкладці, з мінімальним або відсутнім повітряним зазором між модулем і дахом.

Робочі температури масивів із прямим кріпленням зазвичай вищі, ніж у випадку з іншими методами кріплення.

Застосування прямого кріплення має тенденцію до популяризації для нових тонкоплівкових продуктів, які не настільки чутливі до температури під час роботи.

2 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ КОМПОНЕНТІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

2.1 Визначення навантаження підприємства

Для визначення необхідних компонентів сонячної електростанції необхідно мати уявлення про роботу підприємства протягом доби та наявного навантаження. Для цього потрібно розрахувати електричного навантаження підприємства методом коефіцієнта попиту.

Основою вибору всіх елементів системи електропостачання виступають розрахунки величини електричних навантажень.

Максимальні значення активних, реактивних та повних навантажень цехів та підприємства в цілому P_M , Q_M , S_M обчислюються за коефіцієнтом попиту.

Розрахунок проводиться у табличній формі за наступним алгоритмом:

1. У перший стовпчик таблиці 2.1 заносяться за списком споживачі відповідно до вихідних даних. У другий їхні встановлені номінальні потужності.
2. Для кожного цеху з довідкової літератури визначається коефіцієнт попиту K_D і коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ та заносяться у стовпчики 3 і 4.
3. За вибраним значенням $\cos\varphi$ обчислюється коефіцієнт реактивної потужності $\tan\varphi$ та вноситься у 5 стовпчик.
4. Обчислювані активна та реактивна потужності силового обладнання цеху можуть бути розраховані за методом коефіцієнта попиту та вносяться, відповідно, у стовпчики 6 і 7.

$$P_{m.c.} = K_n P_n, Q_{m.c.} = P_{m.c.} \cdot \tan\varphi.$$

5. Розрахункові потужності i -го цеху складаються із суми розрахункових потужностей силового й освітлювального навантажень:

$$P_{M.i} = P_{m.c} + O_{m.o}, Q_{M.i} = Q_{m.c} + Q_{M.o}$$

$$S_{M.i} = \sqrt{P_{M.i}^2 + Q_{M.i}^2}$$

Таблиця 2.1 – Структура навантаження підприємства

Споживачі	Силове навантаження						Освітлювальне навантаження					Всього		
	$P_{\text{н}},$ кВт	K_n	$\cos\varphi$	$\tg\varphi$	$P_{\text{мс}},$ кВт	$Q_{\text{мс}},$ квар	$F, \text{ м}^2$	$P_{\text{н.о}},$ кВт	$P_{\text{но}},$ кВт	$K_{\text{по}}$	$P_{\text{мо}},$ кВт	$P_{\text{м}},$ кВт	$Q_{\text{м}},$ квар	$S_{\text{м}},$ кВА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1. Адміністрація	30	0.6	0.90	0.48	18	9	700	0.012	8	0.95	8	26	9	27
2. Котельня	20	0.7	0.8	0.75	14	11	300	0.012	4	0.95	3	17	11	20
3. Насосна 0.4 кВ	20	0.8	0.80	0.75	16	12	130	0.012	2	0.95	1	17	12	21
4. Транспортний цех	45	0.5	0.90	0.48	23	11	800	0.012	10	0.95	9	32	11	33
5. Ремонтно-механічний цех	50	0.5	0.80	0.75	25	19	1000	0.012	12	0.95	11	36	19	41
6. Гараж	20	0.45	0.85	0.62	9	6	400	0.012	5	0.60	3	12	6	13
Всього по підприємству	185				105	66	3330		40		36	141	66	156

Таблиця 2.2 – Дані про генерацію та споживання електроенергії

Час	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Генерація	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	15.7	36.9	83.1	117.9	177.8	172.7	239.1	280.9	259.2	226.6	171.4	126.1	69.2	20.3	11.6	0.0	0.0
Споживання	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	56.4	141.0	141.0	141.0	141.0	126.9	141.0	141.0	141.0	141.0	98.7	28.2	28.2	28.2	28.2	28.2	28.2
Різниця	-14.1	-14.1	-14.1	-14.1	-14.1	-14.1	-13.3	-40.7	-104.1	-57.9	-23.1	36.8	45.8	98.1	139.9	118.2	85.6	72.7	97.9	41.0	-7.9	-16.6	-28.2	-28.2

6. У стовпчик 8 заноситься площа приміщень цехів.

7. Розрахункова активна потужність освітлення визначається за формулою:

$$P_{M.o} = P_{nut.o} \cdot K_{no} \cdot F,$$

де K_{no} – коефіцієнт попиту освітлювального навантаження;

$P_{nut.o}$ – питома потужність освітлення;

F – освітлювана площа приміщення.

У стовпчик 10 заносяться проміжні значення потужності освітлення за виразом:

$$P_{no} = P_{nut.o} \cdot F.$$

У стовпчик 11 вписуємо визначені коефіцієнти попиту освітлення.

8. За формулами, що наведені у п.5 визначаємо розрахункові максимальні потужності та заносимо їх до стовпчиків 13, 14 і 15.

9. У останньому рядку таблиці підсумовуємо потужності та знаходимо повні потужності підприємства.

Також відомо, що споживання підприємством електроенергії відбувається відповідно до добового графіку навантажень рис. 2.1.

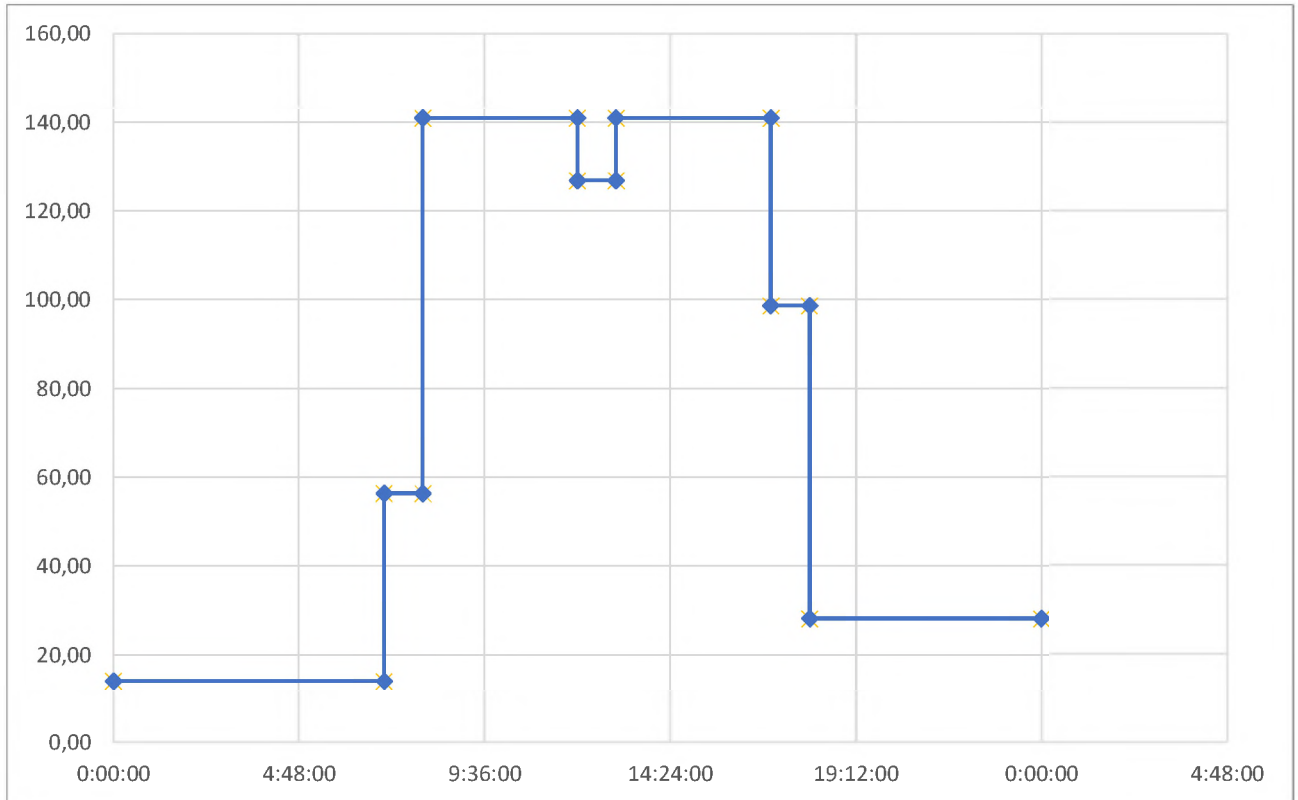


Рисунок 2.1 – Добовий графік навантажень підприємства

З даного графіку виходить, що пік споживання припадає на період з 8 до 17 години. Максимальне одночасне навантаження складає 141 кВт. Відштовхуючись від цього попередньо приймемо сумарну потужність фотоелектричних панелей на рівні 300 кВт. Таким чином графік потужності, що генерується протягом доби сонячною електростанцією відповідно, до даних місцевості в околицях м. Дрогобич буде мати вигляд як показано на рис. 2.2.

Дані для побудови графіка було отримано за допомогою скрипту написаного на Python. Лістинг коду приведений нижче.[9]

Лістинг коду.

1. `import pandas as pd`
2. `import matplotlib.pyplot as plt`
3. `import requests`
4. `import pvlib`
5. `from pvlib.location import Location`
6. `from pvlib.temperature import TEMPERATURE_MODEL_PARAMETERS`
7. `from datetime import datetime`
- 8.
9. `# === Дата і місце ===`

```

10.latitude = 49.36198907786289
11.longitude = 23.56386562971397
12.tz = 'Europe/Kyiv'
13.date = '2025-05-07'
14.surface_tilt = 30
15.surface_azimuth = 180
16.power_capacity = 300 # kW peak
17.
18.# === Отримання даних про погоду ===
19.def get_weather_from_open_meteo(lat, lon, date):
20.    url = "https://api.open-meteo.com/v1/forecast"
21.    params = {
22.        "latitude": lat,
23.        "longitude": lon,
24.        "start_date": date,
25.        "end_date": date,
26.        "hourly":
27.            "temperature_2m,direct_normal_irradiance,shortwave_radiation,diffuse_radiati
28.            on,wind_speed_10m",
29.        "timezone": "auto"
30.    }
31.    response = requests.get(url, params=params)
32.    data = response.json()
33.    hourly = data['hourly']
34.    df = pd.DataFrame({
35.        'temp_air': hourly['temperature_2m'],
36.        'dni': hourly['direct_normal_irradiance'],
37.        'ghi': hourly['shortwave_radiation'],
38.        'dhi': hourly['diffuse_radiation'],
39.        'wind_speed': hourly['wind_speed_10m'],
40.    }, index=pd.to_datetime(hourly['time']))
41.    return df.tz_localize(None).tz_localize(tz)
42.
43.# === Отримуємо погоду ===
44.weather = get_weather_from_open_meteo(latitude, longitude, date)
45.
46.# === Ініціалізація розташування та фотоелектричної системи ===
47.site = Location(latitude, longitude, tz)
48.temp_model =
49.    TEMPERATURE_MODEL_PARAMETERS['sapm']['open_rack_glass_glass']
50.system = pvlib.pvsystem.PVSystem(
51.    surface_tilt=surface_tilt,
52.    surface_azimuth=surface_azimuth,

```

```

53. module_parameters={'pdc0': power_capacity, 'gamma_pdc': -0.004},
54. inverter_parameters={'pdc0': power_capacity, 'pac0': power_capacity},
55. temperature_model_parameters=temp_model,
56. albedo=0.2
57.)
58.
59.# === Моделювання===
60.modelchain = pvlib.modelchain.ModelChain(system, site,
    aoi_model='no_loss')
61.modelchain.run_model(weather)
62.ac_power = modelchain.results.ac
63.ac_power.to_csv('ac_power_output.csv', header=True, sep=';')
64.# === Побудова графіка ===
65.plt.figure(figsize=(12, 6))
66.ac_power.plot(label='AC Power (kW)', color='orange')
67.plt.title(f'Real Weather PV Output on {date}")
68.plt.xlabel("Time")
69.plt.ylabel("AC Power (kW)")
70.plt.grid(True)
71.plt.legend()
72.plt.tight_layout()
73.plt.show()
74.
75.# === Сумарна енергія за добу ===
76.energy_kwh = ac_power.sum()
77.print(f"\nEstimated daily energy output: {energy_kwh:.2f} kWh")

```

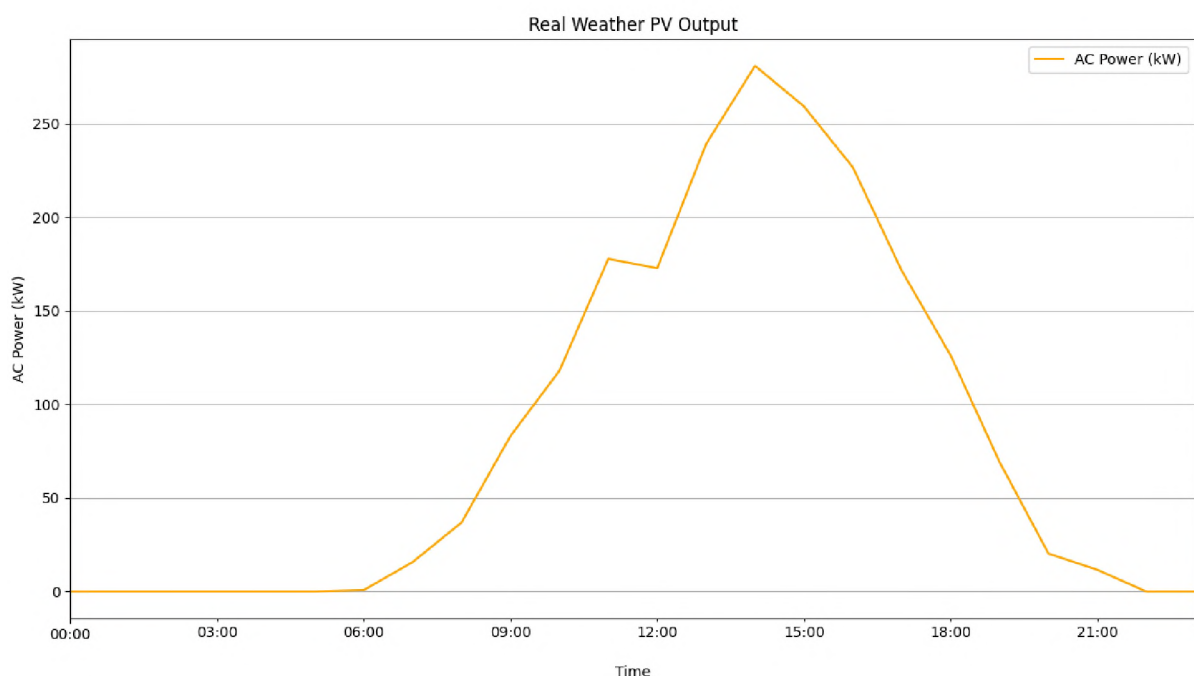


Рисунок 2.2 – Графік генерації станцією потужністю 300 кВт

З порівняння графіків споживання (рис. 2.1) та генерації (рис. 2.2) можна дійти висновку, що вони, як і очікувалось, не співпадають через низьку активність сонця зранку та ввечері, а також відсутність генерації в нічну пору доби. Таким чином, щоб забезпечити безперебійну роботу підприємства потрібно передбачити передовсім наявність акумуляторних батарей.

$$\sum_{i=1}^{24} E_{ген} = 2009.4 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

$$\sum_{i=1}^{24} E_{спож} = 1677.9 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Згідно графіків за період низької активності сонця та відсутності генерації підприємство споживає 404 кВт*год електроенергії. Водночас надлишок енергії під час найвищої активності сонця складає:

$$\sum_{i=1}^{24} E_{надл} = 2009.4 - 1677.9 = 331.5 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Типова допустима глибина розряду акумуляторних батарей за технологією LiFePO4 складає до 90%. Таким чином приймемо потужність акумуляторних батарей рівною 500 кВт.

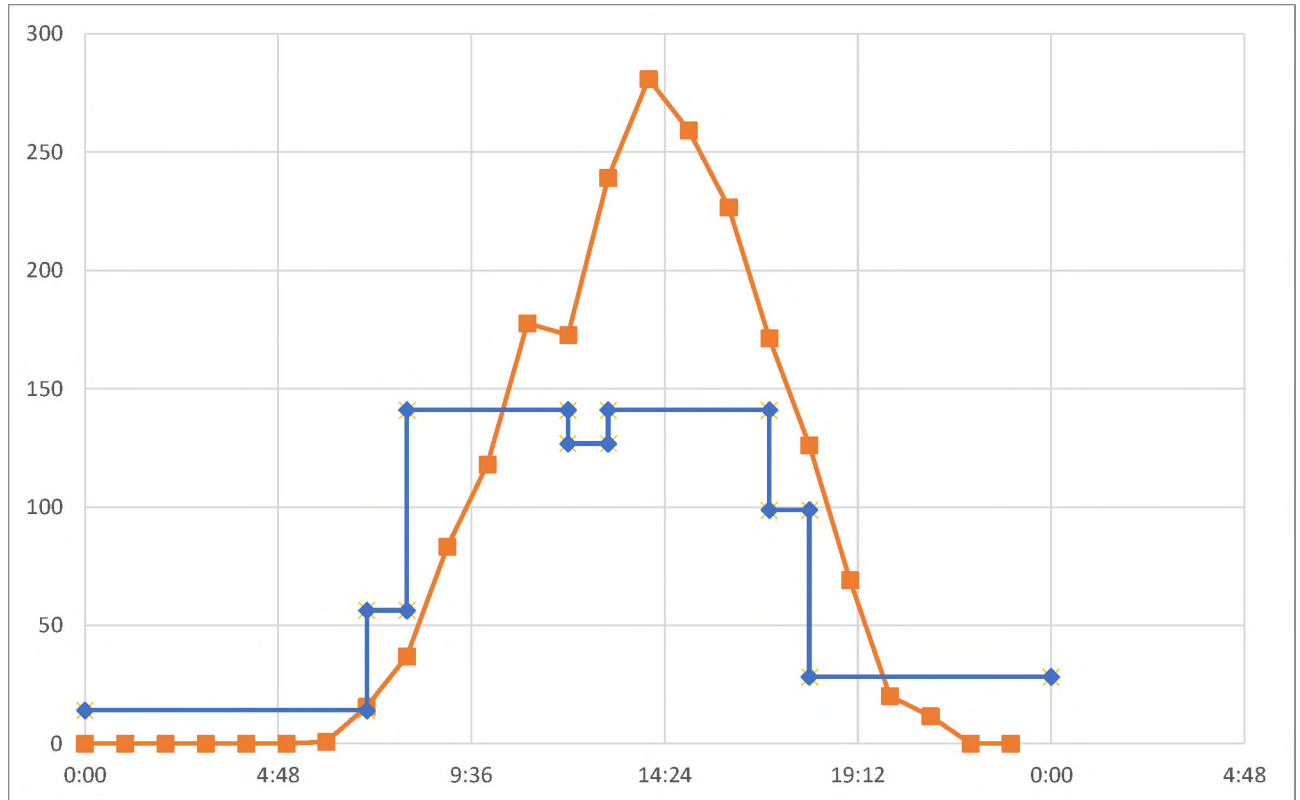


Рисунок 2.3 – Суміщені графіки генерації та споживання

З графіку рис. 2.3 чітко видно період надлишкової генерації з 10:30 до 19:50 та час, коли споживання перевищує можливості сонячної електростанції – з 0:00 до 10:30 та з 19:50 до 0:00.

З цих даних впливає інший графік, а саме графік заряду та розряду акумуляторних батарей представлений на рис. 2.4, який в свою чергу складений за раніше наведеною таблицею 2.2.

З даного графіку видно, що можливість підзарядки акумуляторів співпадає з надлишковою енергією сонця, що надходить на фотоелектричні панелі з 10:30 до 19:50, а з 19:50 до 10:30 ранку наступного дня підприємство розраховує на запасену енергію протягом попереднього циклу сонячної активності на даній місцевості.

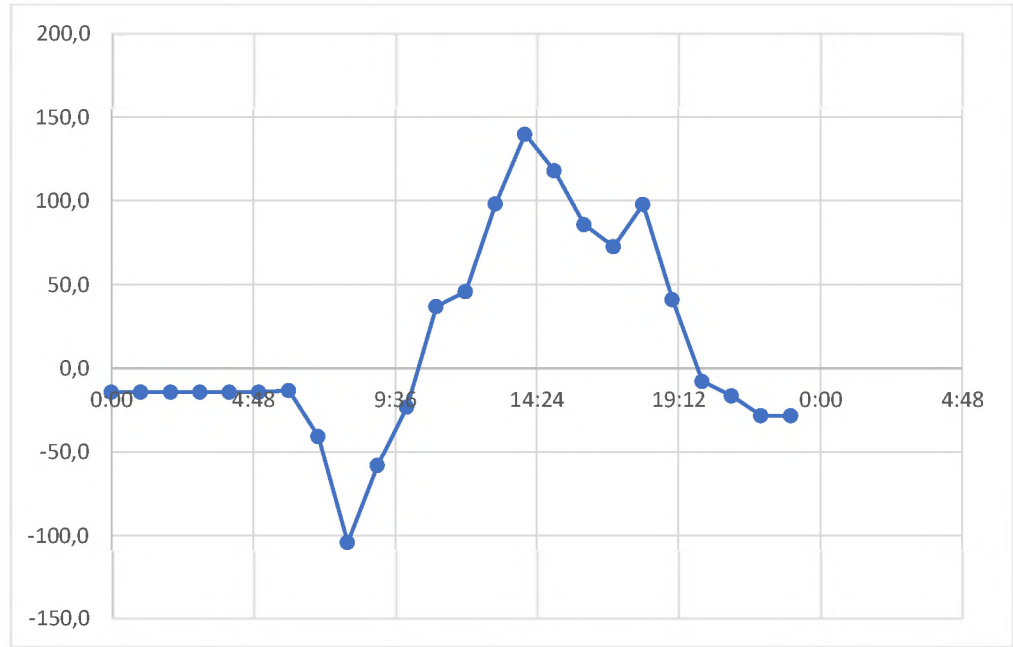


Рисунок 2.4 – Орієнтовний графік заряду-розряду акумуляторних батарей

3 ВИБІР ОСНОВНИХ КОМПОНЕНТІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ НА ПІДСТАВІ ВИКОНАНОГО РОЗРАХУНКУ

3.1 Вибір фотоелектричних панелей

Основою фотоелектричної станції є її панелі. Для потужних установок генерації рекомендують використовувати великі сонячні панелі. Зупинимо свій вибір на JKM570N-72HL4-BDV від компанії Jinko потужністю 570 Вт, характеристики якої приведені в табл. 3.1. Її продукція вирізняється серед інших деякими особливостями та перевагами серед них:

SMBB(SUPER MULTI BUSBAR) Технологія. Покращене захоплення світла та збір струму для підвищення вихідної потужності модуля та надійності.

Hot 2.0 Технологія. Модуль N-типу з технологією Hot 2.0 має кращу надійність і нижчий LID/LETID (типи деградації).

PID Опір. Відмінна гарантія ефективності Anti-PID(протидія PID деградації) завдяки оптимізованому процесу масового виробництва та контролю матеріалів.

Посилене механічне навантаження. Сертифіковано на витримку: вітрового навантаження (2400 Па) і снігового навантаження (5400 Па.).

Вища вихідна потужність. Потужність модуля загалом збільшується на 5-25%, що значно знижує LCOE(вартість електроенергії з часом) і підвищує IRR(швидкість повернення коштів).

На рисунку 3.1 приведені креслення панелі із зазначенням розмірів. Нас цікавить передовсім ширина та довжина. За наявними даними ми можемо вирахувати кількість панелей необхідних для покриття потреб генерації та площу, яку вони будуть займати.[3]

Виходячи з необхідної потужності ФЕС 300 кВт визначаємо потрібну кількість панелей:

$$N_n = \frac{P_{\text{ФЕС}}}{P_n} = \frac{300 \cdot 10^3}{570} \approx 527 = 530$$

Площа однієї панелі:

$$S_n = l_n \cdot b_n = 2278 \cdot 10^{-3} \cdot 1134 \cdot 10^{-3} = 2.58 \text{ м}^2$$

Площа всіх панелей

$$\Sigma S_n = N_n \cdot S_n = 530 \cdot 2,58 = 1367,4 \text{ м}^2$$

Аналізуючи отримані результати можна дійти висновку, що панелі доцільно розмістити на дахах транспортного та ремонтно-механічного цехів. Враховуючи, що площина цехів без ухилу панелі розміщуємо на рамкових опорах, які були розглянуті в першому розділі.

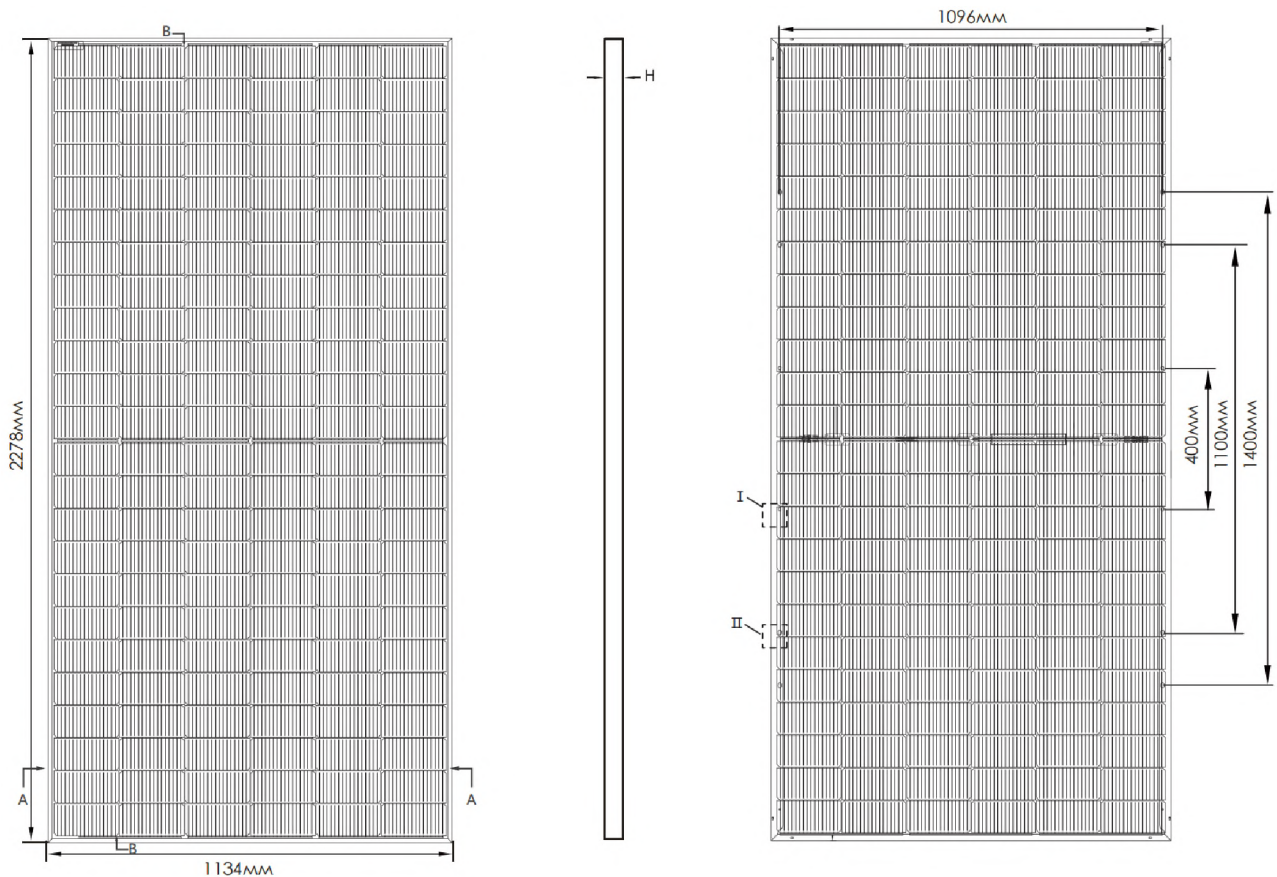


Рисунок 3.1 – Креслення фотоелектричної панелі JKM570N-72HL4-BDV

Важливими показниками, що характеризують генерацію при різних ступенях освітленості є вольт-амперні та вольт-ватні характеристики фотоелектричної панелі, приведені на рис.3.2. Зміна таких характеристик, як струм короткого замикання, напруга холостого ходу та максимальна потужність панелі в залежності від температури комірок приведена на рис 3.3.

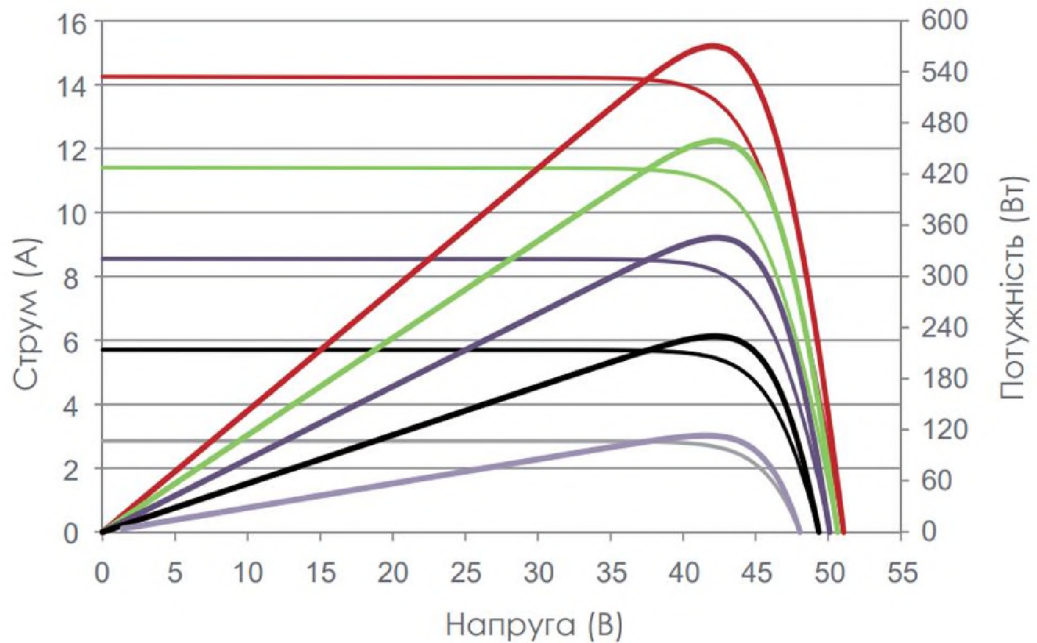


Рисунок 3.2 – Вольт-амперні та вольт-ватні характеристики

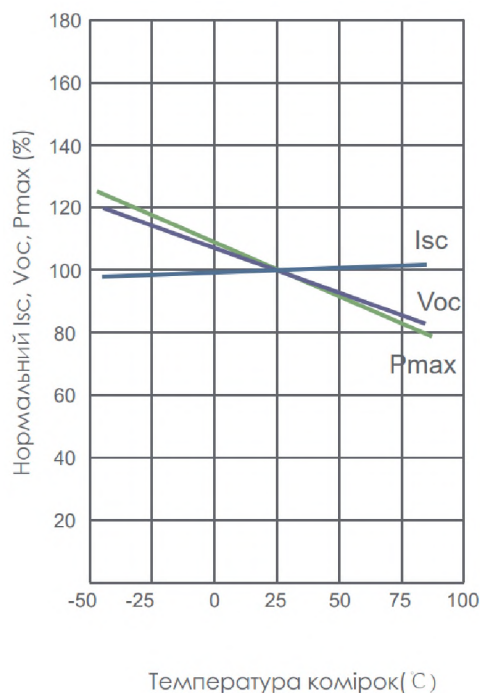


Рисунок 3.3 – Залежність напруги холостого ходу, струму короткого замикання та максимальної потужності панелі від температури комірок

Таблиця 3.1 – Характеристики фотоелектричної панелі JKM570N-72HL4-BDV

Параметр	STC	NOCT
Макс., потужність (P_{max})	570Вт	429Вт
Макс., напруга живлення (V_{mp})	42.29В	39.65В
Макс., сила струму (I_{mp})	13.48А	10.81А
Напруга холостого ходу (V_{oc})	51.07В	48.51В
Струм короткого замикання (I_{sc})	14.25А	11.50А
Ефективність STC (%)	22.07%	
Робоча температура (°C)	-40°C~+85°C	
Максимальна напруга системи	1500В DC (IEC)	
Запобіжник	30А	
Толеранс потужності	0~+3%	
Температурні коефіцієнти P_{max}	-0.30%/°C	
Температурні коефіцієнти V_{oc}	-0.25%/°C	
Температурні коефіцієнти I_{sc}	0.046%/°C	
Номінальна робоча температура елемента (NOCT)	45±2°C	
Двосторонній фактор	80±5%	

STC (Standard Test Conditions) – це набір умов, за яких сонячні панелі тестуються в лабораторії, тоді як NOCT (Normal Operating Cell Temperature) – це більш реалістичне відображення того, як панель працюватиме в польових умовах. NOCT враховує такі фактори, як температура навколишнього повітря, рівень сонячного випромінювання та швидкість вітру, що дозволяє отримати практичнішу оцінку потужності.

STC (Стандартні умови тестування):

- Сонячне випромінювання: 1000 Вт/м² (максимальне сонячне світло)
- Температура комірки: 25°C
- Повітряна маса: 1.5

NOCT (Нормальна робоча температура комірки):

- Сонячне випромінювання: 800 Вт/м² (реалістичніше сонячне світло)

- Температура навколишнього середовища: 20°C
- Швидкість вітру: 1 м/с (охолоджує панель, більш реалістично)

3.2 Акумулятори

До акумуляторних батарей, що працюють в складі фотоелектричних станцій висувається ряд вимог, серед них:

- Глибокий цикл розряду – здатність витримувати регулярне глибоке розрядження без втрати ємності.
- Тривалий термін служби – бажано 5–15 років.
- Стійкість до температурних коливань.
- Низьке саморозрядження.

На акумулятори покладається задача збереження надлишку енергії, вирівнювання навантаження, підтримувати надійність і безперервність живлення.

Таким характеристикам відповідає акумуляторний модуль BOS-GM5.1 потужністю 5.1 кВт у складі акумуляторного боксу BoS-G 61 кВт. його переваг відносять:

Зручність. Швидкий монтаж у форматі стандартного 19-дюймового вбудованого модуля забезпечує зручність встановлення та обслуговування.

Безпека та надійність. Катод виготовлено з матеріалу LiFePO_4 , що відзначається високою безпекою та тривалим терміном служби.

Модуль має низький саморозряд – до 6 місяців зберігання без підзарядки. Відсутній ефект пам'яті, чудова ефективність при неповному циклі заряд/розряд.

Інтелектуальна система управління BMS. Система забезпечує захист від надмірного розряду, перезаряду, надструму, а також від надто високої або низької температури. Автоматично керує процесами заряджання та розряджання, а також балансуванням струму й напруги кожної комірки.[4]

Екологічність

Увесь модуль нетоксичний, не забруднює довкілля й є екологічно безпечним.

Гнучка конфігурація. Можливе паралельне з'єднання декількох модулів для збільшення ємності та потужності.

Підтримка оновлення через USB, Wi-Fi (опціонально) та віддалене оновлення (сумісне з інверторами Deye).

Широкий температурний діапазон. Діапазон робочих температур: від -20°C до $+55^{\circ}\text{C}$, з чудовими характеристиками розряду та тривалим терміном експлуатації.

Загалом для станції, що розробляється необхідно 8 боксів, як показано на рисунку 3.4. Загальна кількість акумуляторів складе 96 штук.



Рисунок 3.4 – Акумуляторний бокс BoS-G 61 кВт

Таблиця 3.2 – Параметри акумуляторного бокса VoS-G 61 кВт

Параметр		Значення
Тип елемента		LiFePO4
Енергія одного акумуляторного модуля, кВт*год		5,12
Номінальна напруга, В		51,2
Ємність, А*год		100
Кількість послідовно з'єднаних модулів		12
Номінальна напруга збірки, В		614,4
Діапазон робочої напруги збірки, В		538-691
Потужність збірки, кВт*год		61,44
Доступна потужність, кВт*год		55,29
Струм зарядку/розряду, А	Рекомендований	50
	Номінальний	100
	Максимальний(2 хв. 25°C)	125
Робоча температура заряджання, °C		0-55
Робоча температура розряджання, °C		-20-55
Комунікаційний інтерфейс		CAN 2.0/RS485
Відносна вологість		5-85%
Висота, м		до 2000
Клас захисту		IP20
Глибина розряджання		90%
Кількість циклів заряду/розряду		Більше 6000
Гарантія		10 років
Розміри в зборі, Ширина*Глибина*Висота, мм		589*590*2240
Маса одного акумулятора, кг		44

Модуль керування високовольною акумуляторною збіркою HVБ750V/100A-EU забезпечує узгодження роботи акумуляторних батарей та фотоелектричних панелей його параметри приведені в таблиці 3.3. Окремо

приведені параметри акумулятора BOS-GM5.1, що входить в склад високовольтного боксу(табл.3.4).

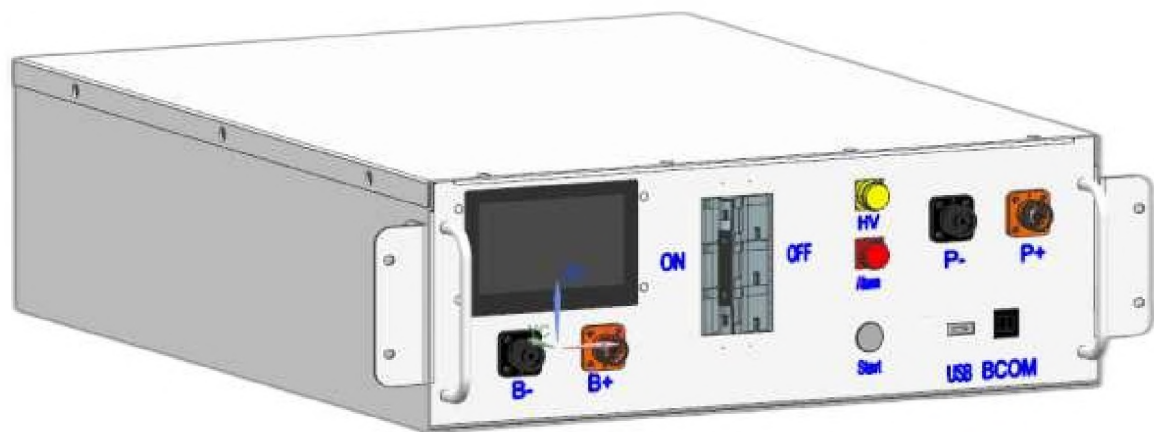


Рисунок 3.5 – Вигляд модуля керування високовольтною акумуляторною збіркою HVB750V/100A-EU

Таблиця 3.3 – Характеристики HVB750V/100A-EU

Параметр	Значення
Робоча напруга, В	120-750
Номінальний струм заряду/розряду, А	100
Максимальний струм заряду/розряду, А	125

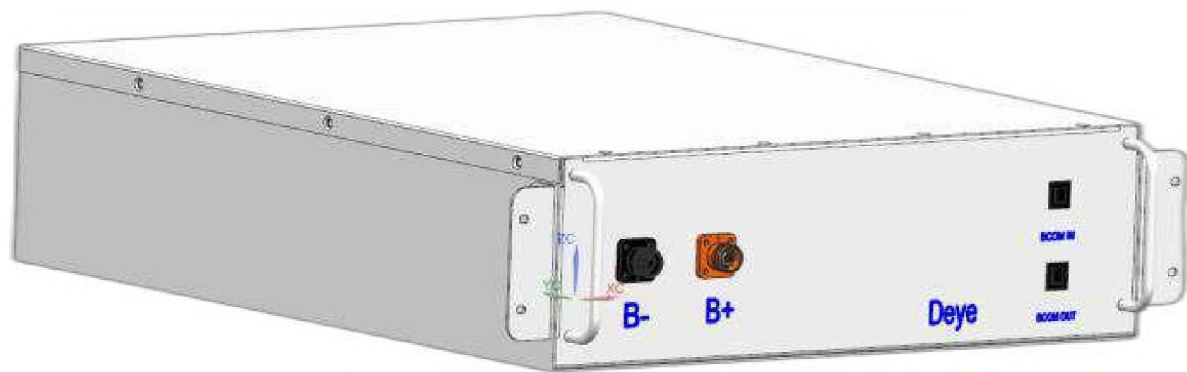


Рисунок 3.6 – Вигляд акумулятора BOS-GM5.1

Таблиця 3.4 – Характеристики акумулятора BOS-GM5.1

Параметр	Значення
Тип елемента	LiFePO ₄
Номинальна напруга, В	51.2
Номинальна ємність, А*год	100
Номинальна енергія, кВт*год	5.12
Номинальний струм заряду/розряду, А	100
Максимальний струм заряду/розряду, А	125
Маса, кг	44

3.3 Інвертор

Зважаючи на велику потужність станції доцільно використати 2 інвертора Huawei SUN2000-150KTL-MG0 по 150 кВт. Його характеристики приведені в таблиці 3.5, а загальний вигляд на рис. 3.7.

Таблиця 3.5 – Характеристики інвертора Huawei SUN2000-150KTL-MG0

Параметр	Значення
Основні	
ККД, %	98,4
Кількість фаз	3
Вхідні	
Номинальна потужність, кВт	150
Максимальна потужність, кВт	150
Максимальна напруга, В	1100
Вихідні	
Номинальна потужність, кВт	150
Максимальна потужність, кВт	165
Вихідна напруга, В	380/400/480
Форма синусоїди	чиста



Рисунок 3.7 –Загальний вигляд інвертора Huawei SUN2000-150KTL-MG0

3.4 Вибір автоматів і роз'єднувачів

В кожну паралельну гілку(стрінг) передбачаємо автомат 16 А DC, виходячи з умови:

$$I_{AB} > I_{ФЕП}$$

$$16 > 14.25 \text{ A}$$

Вимикач навантаження обираємо LBS 160 2P "1-0" 160A 1000V DC ETI.



Рисунок 3.8 – Вимикач навантаження LBS 160 2P "1-0" 160A 1000V DC
ETI.

3.5 Вибір кабельного обладнання

Під'єднання збірок панелей до інверторів фотоелектричної системи потрібно організувати за допомогою кабелів 1000V/4AWG з допустимим струмом 200 А (рис. 3.9).

Між собою панелі з'єднуємо кабелем 14 AWG з допустимим струмом 20 А.

Для позитивного полюса використовується кабель червоного кольору, для негативного – чорного.



Рисунок 3.9 – Кабель 1000V/4AWG

3.6 Вибір компенсуючих пристроїв

Згідно розрахунків табл. 2.1 підприємство споживає значну кількість реактивної енергії. З метою покращення коефіцієнту потужності підприємства доцільно поставити компенсуючі пристрої, а саме: конденсаторні установки.

Реактивна потужність, що споживається підприємством:

$$Q_{\text{нiдп.}} = 66 \text{ квар}$$

А коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{141}{156} = 0.9$$

Оберемо установку компенсації реактивної потужності 60 кВАр ККУ-04-60-2,5-21У3.[10] Тоді:

$$Q_{\text{рез.}} = Q_{\text{нiдп.}} - Q_{\text{кп}} = 66 - 60 = 6 \text{ квар}$$

Повна потужність, що споживається підприємством:

$$S_{\text{рез}} = \sqrt{P^2 + Q_{\text{рез}}^2} = \sqrt{140.78^2 + 6^2} = 140.91 \text{ кВА}$$

Результуючий коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi_{\text{рез}} = \frac{P}{S_{\text{рез}}} = \frac{140.78}{140.91} \approx 1$$



Рисунок 3.10 – Установка компенсации реактивной мощности 60 кВАр
ККУ-04-60-2,5-21У3

4 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ РОЗРОБЛЕНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ В АВТОНОМНОМУ РЕЖИМІ ПРИ ЗМІНЮВАННІ НАВАНТАЖЕННЯ

4.1 Структура фотоелектричного елемента

Як показано на рис. 4.1 фотоелектричний модуль складається з певної кількості комірок, а самі модулі (панелі) об'єднуються паралельно та/або послідовно для отримання потрібної напруги системи.

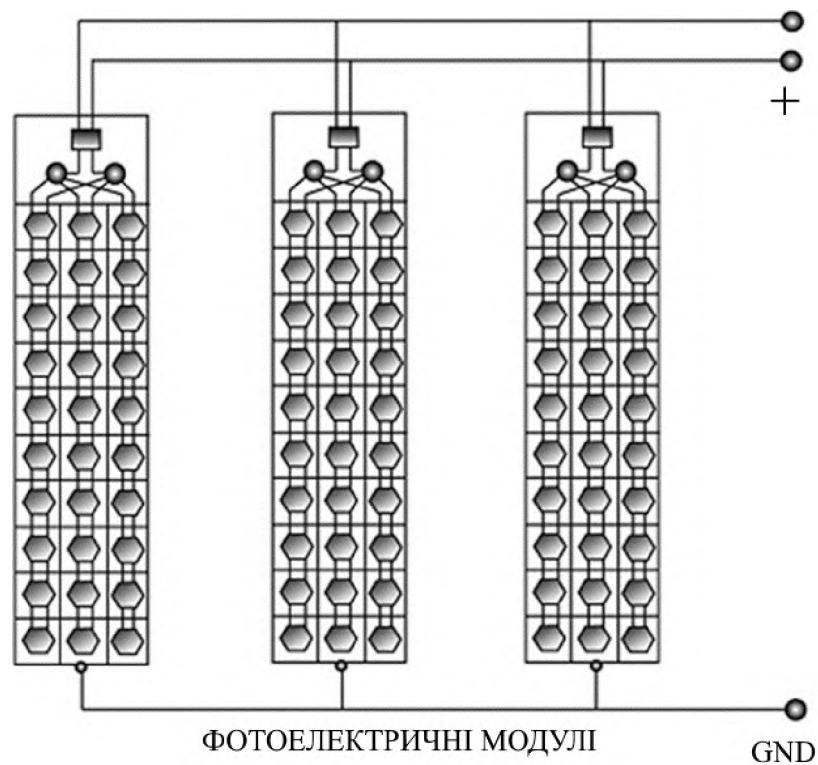


Рисунок 4.1 –Структура фотоелектричного

Базове рівняння з теорії напівпровідників, яке математично описує вольт-амперну характеристику (I – V) ідеального фотоелектричного (ФЕ) елемента, має вигляд:[2]

$$I = I_{pv,cell} - I_{0,cell} \left[\exp\left(\frac{qV}{\alpha kT}\right) - 1 \right], \quad (4.1)$$

де $I_{pv,cell}$ – фотострум комірки,

$I_{0,cell}$ – зворотній струм насичення комірки;

q – заряд електрона;

α – коефіцієнт ідеальності діода;

k – стала Больцмана;

T – температура комірки.

Базове рівняння (4.1) для елементарного ФЕ-елемента не відображає вольт-амперну характеристику реального ФЕ-модуля. З'єднання елементів паралельно збільшує струм, а з'єднання послідовно забезпечує вищу вихідну напругу. Практичні модулі складаються з кількох з'єднаних між собою ФЕ-елементів, і для опису їх характеристик на виводах модуля необхідно доповнити базове рівняння додатковими параметрами:

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_t \alpha} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p},$$

де I_{pv} – фотострум;

I_0 – зворотній струм насичення;

V – напруга діода;

V_t – температурна напруга, пов'язана зі сталою Больцмана;

R_s – послідовний опір;

R_p – паралельний опір.

За параметрами наведеними в табл. 3.1 отримані ВАХ і ВВХ обраного ФЕ-модуля рис. 4.2 при різних рівнях освітлення. Збірка з 530 модулів при різних температурах комірок демонструє ВАХ і ВВХ представлені на рис. 4.3.

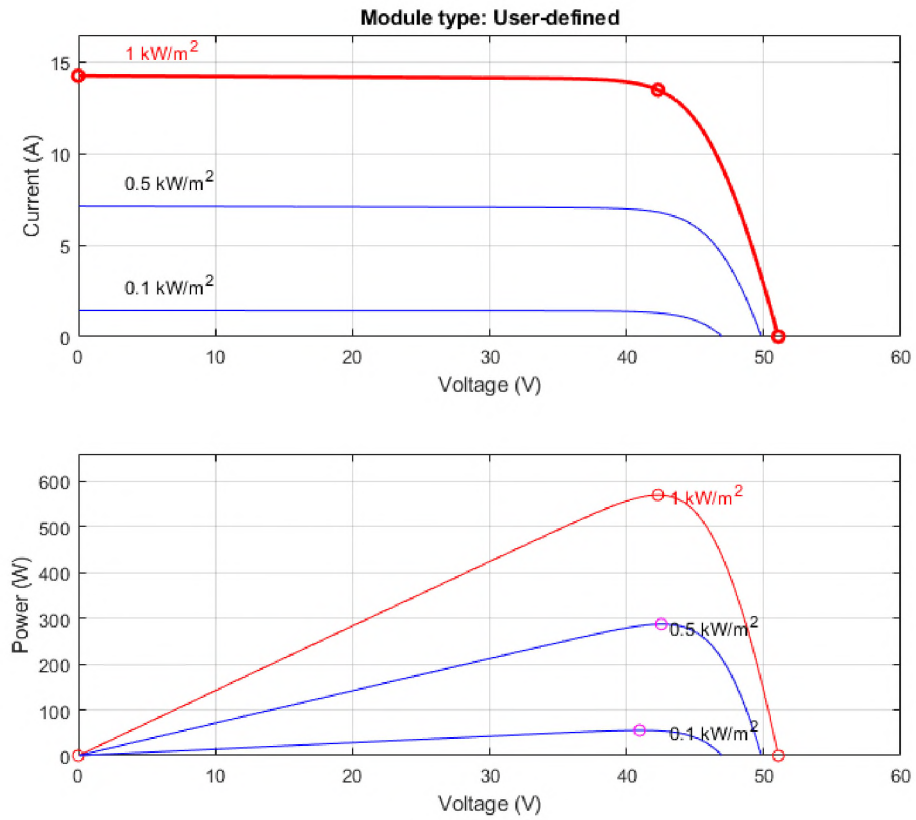


Рисунок 4.2 – Графік ВАХ і ВВХ модуля JKM570N-72HL4-BDV

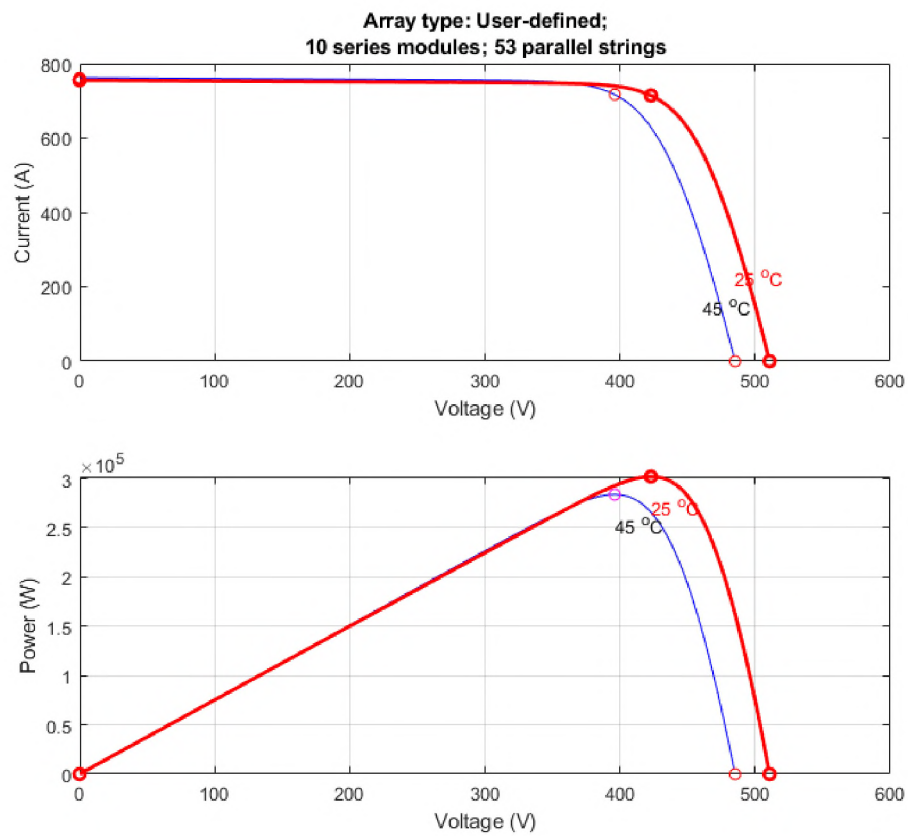


Рисунок 4.3 – Графік ВАХ і ВВХ системи з 530 панелей JKM570N-72HL4-BDV

4.2 Алгоритми відстежування точки максимальної потужності

Протягом останніх десятиліть було розроблено багато методів для знаходження точки максимальної потужності (MPP). Ці методи відрізняються за різними аспектами, такими як необхідні датчики, складність, вартість, діапазон ефективності, швидкість збіжності, точність відстеження при зміні освітленості та/або температури, необхідне обладнання для реалізації. Деякі з найпоширеніших методів MPPT (відстеження точки максимальної потужності):

1. Метод збурення та спостереження (метод підйому на гору).
2. Метод приросту провідності.
3. Метод часткового струму короткого замикання.
4. Метод часткової напруги холостого ходу.
5. Нечітка логіка.
6. Нейронні мережі.[3]

Серед наведених методів метод збурення та спостереження (P&O) і алгоритм приросту провідності (InCond) є найпоширенішими. Інші методи, що базуються на різних принципах, можуть включати керування на основі нечіткої логіки, нейронні мережі, метод часткової напруги холостого ходу або струму короткого замикання тощо. Більшість із цих методів дають локальний максимум, а деякі, як-от методи часткової напруги холостого ходу або струму короткого замикання, забезпечують лише приблизне значення MPP, а не точний результат.

У нормальних умовах крива залежності потужності від напруги ($V-P$) має лише один максимум. Проте, якщо сонячна панель частково затінена, на цій кривій можуть з'явитися кілька максимумів. Обидва алгоритми — P&O та InCond — базуються на принципі «підйому на гору», що полягає в переміщенні робочої точки сонячної панелі в напрямку збільшення потужності. Техніки підйому на гору є найпопулярнішими методами MPPT завдяки простоті реалізації та хорошій продуктивності при постійній освітленості.

Перевагами обох методів є простота та низькі вимоги до обчислювальних ресурсів. Недоліки: виникають коливання навколо MPP, а також можливість

втрати правильної траєкторії і відстеження MPP у неправильному напрямку за умов різких змін атмосферних умов.

4.2.1 Метод збурення та спостереження

У методі P&O (збурення та спостереження) використовується лише один датчик напруги для вимірювання напруги на масиві сонячних панелей, що знижує вартість реалізації. Алгоритм передбачає збурення (зміну) коефіцієнта заповнення імпульсів (duty cycle) перетворювача, а також збурення робочої напруги постійному колі між сонячними панелями і перетворювачем.

Зміна коефіцієнта заповнення перетворювача потужності означає зміну напруги в DC-ланцюгу між сонячним масивом і перетворювачем. У цьому методі знак останнього збурення і знак останньої зміни потужності використовуються для визначення напрямку наступного збурення. Як показано на рис. 4.4, ліворуч від точки максимальної потужності (MPP) збільшення напруги призводить до збільшення потужності, тоді як праворуч — зменшення напруги призводить до зменшення потужності.

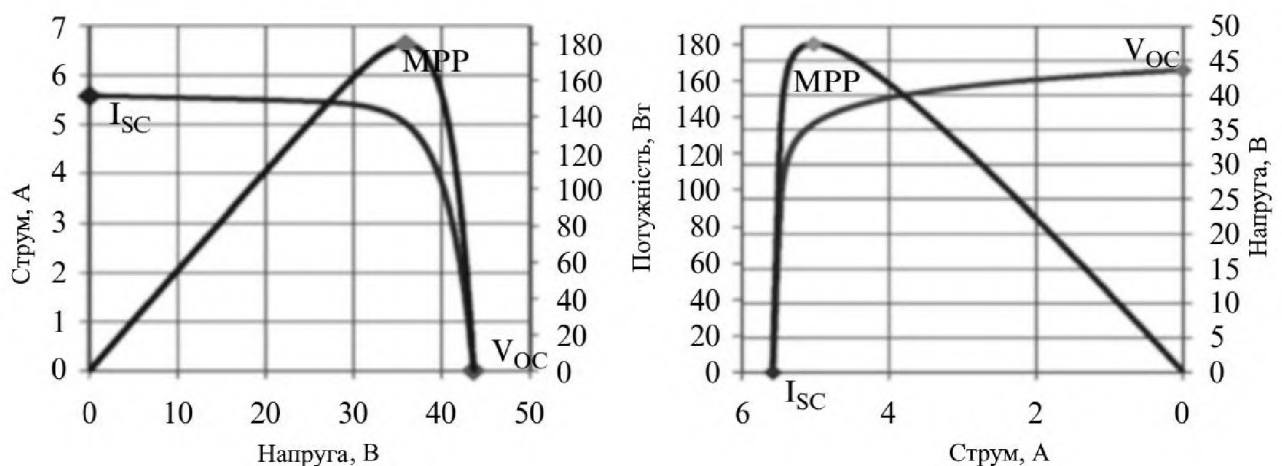


Рисунок 4.4 – Характеристики ФЕП при знаходженні MPP

Якщо потужність зросла, наступне збурення має бути в тому ж напрямку, а якщо зменшилась — наступне збурення має бути в протилежному напрямку. Виходячи з цих принципів, алгоритм реалізується згідно з блок-схемою, наведеною на рис. 4.5, і процес повторюється, доки не буде досягнуто MPP. Робоча точка коливається навколо точки максимальної потужності.

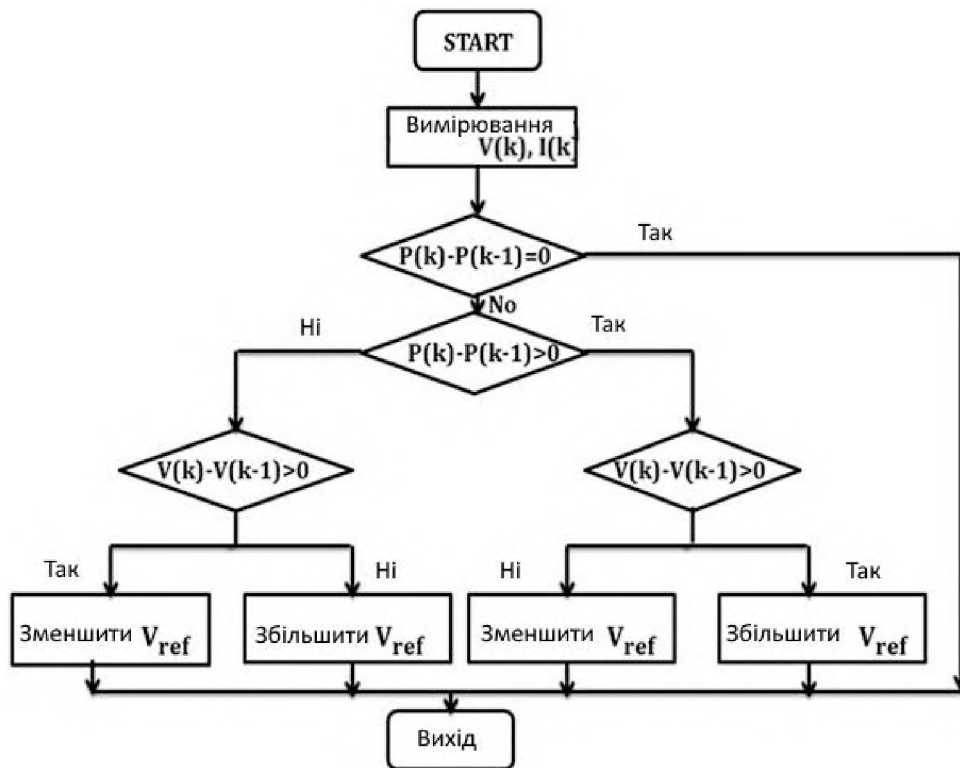


Рисунок 4.5 – Блок-схема алгоритму P&O алгоритму

4.3 Математична модель у Matlab/Simulink

Математична імітаційна модель розробленої фотоелектричної системи зібрана в Simulink Matlab[11] представлена на рисунку 4.6. До її складу входить масив ФЕ-модулів, на вхід яких надходить значення опромінення. Згенерована енергія постійного струму подається на блок акумуляторних батарей та інвертор, який реалізований на IGBT-транзисторах, керованих генератором імпульсів, що реалізує алгоритм пошуку точки максимальної потужності за блок-схемою рис. 4.5. З інвертора змінна напруга постачається на трифазне навантаження.

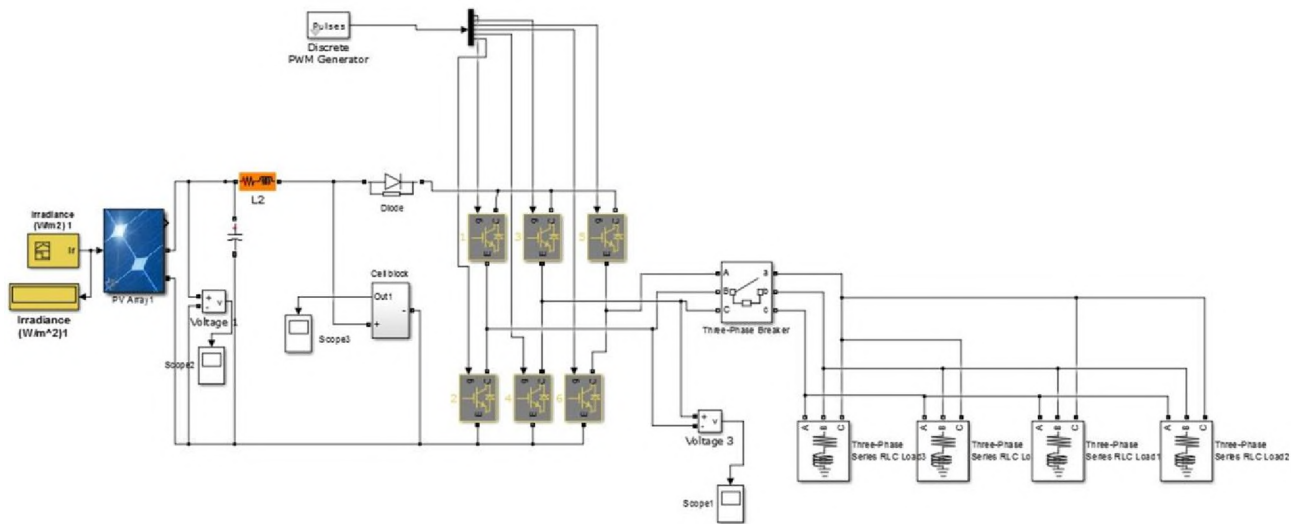


Рисунок 4.6 – Математична імітаційна модель розробленої фотоелектричної системи зібрана в Simulink Matlab

Підсистема акумуляторних батарей представлена на рисунку 4.7. Вихідна напруга фотоелектричного модуля у складі загальної електричної установки представлена у вигляді графіку на рис. 4.8. Графік синусоїди на виході інвертора представлений на рис. 4.9.

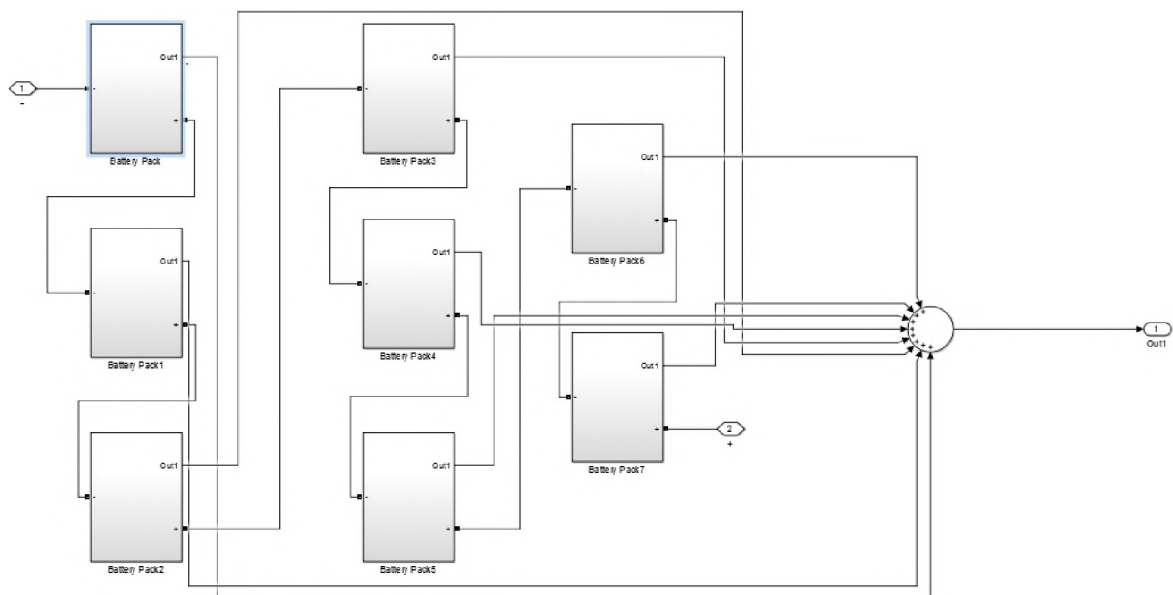


Рисунок 4.7 – Блок акумуляторних батарей

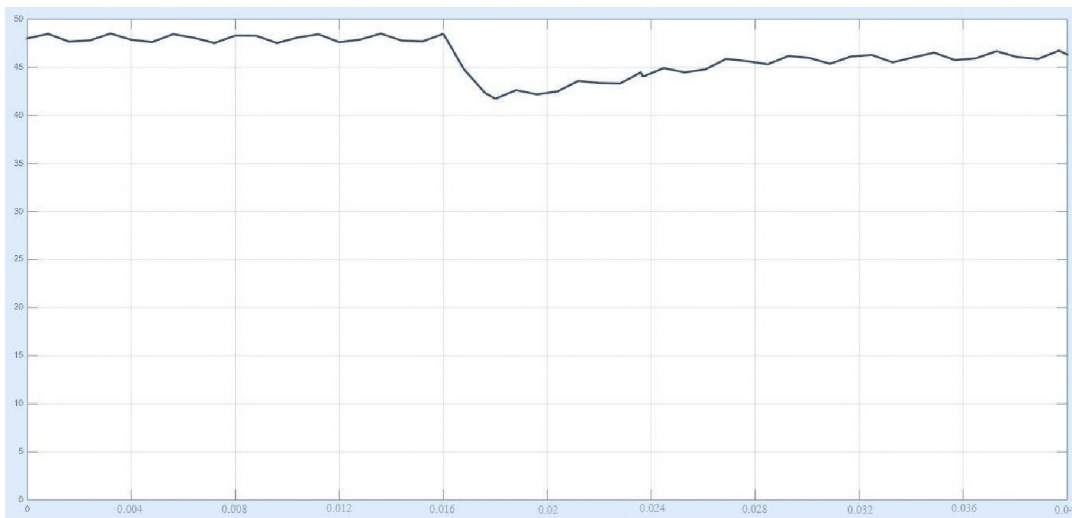


Рисунок 4.8 – Графік напруги фотоелектричного модуля у складі установки

На рисунку 4.9 продемонстрована вихідна напруга інвертора з чистою синусоїдою, реалізація якої можлива при застосуванні IGBT-транзисторів із високою частотою перемикання.

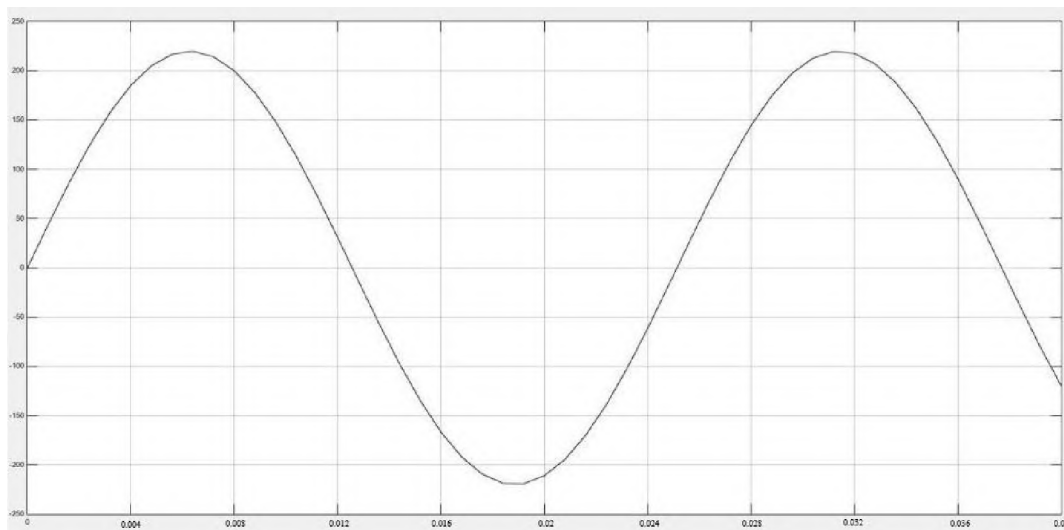


Рисунок 4.9 – Графік напруги змінного струму на виході інвертора

ВИСНОВКИ

У даній випускній кваліфікаційній роботі розроблена автономна фотоелектрична станція промислового підприємства. Під час виконання роботи досліджені питання сучасних підходів до розробки та проєктування фотоелектричних станцій промислових об'єктів, вивчений перелік нормативних документів, спираючись на які мають бути розроблені сонячні електростанції в Україні. Розглянутий і вивчений перелік кроків спрощеного підходу у розробці автономних систем. Вивчено питання розташування сонячних панелей з точки зору підвищення продуктивності та ефективності генерації.

Розраховано навантаження споживачів на підприємстві за методом коефіцієнта попиту. Визначена активна та реактивна складова потужності. Отриманий і побудований добовий графік навантаження підприємства. Для визначеної місцевості в околицях міста Дрогобич отриманий графік генерації електроенергії. Попередньо визначена потужність акумуляторних батарей для підтримання робочого циклу підприємства протягом доби. Побудований графік заряду-розряду акумуляторів.

За каталожними даними обрані панелі JKM570N-72HL4-BDV від компанії Jinko у кількості 530 шт. Акумулятори в кількості 96 штук по 12 штук в акумуляторному боксі фірми Deye. Побудовані на технології LiFePO₄ з підтримкою глибокого розряду до 90%. Інверторами виступатимуть 2 пристрої Huawei SUN2000-150KTL-MG0 потужністю 150 кВт з вихідною напругою 0,4 кВ та чистою синусоїдою. Додатково обрані автомати, роз'єднувачі, кабелі. З метою підвищення коефіцієнту потужності встановлена конденсаторна батарея потужністю 60 квар.

Вивчена структура фотоелектричного елемента, модуля, отримані графіки ВАХ та ВВХ, вивчений найпоширеніший метод пошуку точки максимальної потужності – Р&О, зібрано модель розробленої системи у Simulink/Matlab, проведено моделювання, отримані графіки фотоелектричного модуля та синусоїди на виході інвертора.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. R. A. Messenger and A. Abtahi, Photovoltaic Systems Engineering, Third Edition, 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010.
2. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії / Кудря С.О. – Підручник. – Київ: Національний технічний університет України («КПІ»), 2012. – 495 с
3. M. F. Muller, Ed., Photovoltaic modeling handbook. Wiley-Scrivener, 2019.
4. A. A. Elbaset and M. S. Hassan, Design and power quality improvement of photovoltaic power system, 1st ed. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2016.
5. A. Smets, K. Jager, O. Isabella, and R. van Swaaij, Solar Energy. Cambridge, England: UIT Cambridge, 2016.
6. Вибір потужності сонячних батарей та кута нахилу панелей. СТЕМ – Інтелектуальні системи.
7. Бскіров Е. А. Автономні джерела живлення на базі сонячних батарей. – Сімферополь: ВД «Аріал», 2011. – 484 с.
8. Невичерпна енергія: Кн. 3. Альтернативна енергетика / В.С. Кривцов, О.М. Олейников, О.І. Яковлев. –Х.: НАУ "ХАІ", Севастополь: СНТУ, 2006. – 643 с.
9. Кузнєцов Д. І. Інформаційна система прогнозування кількості виробленої енергії сонячною електростанцією / Кузнєцов Д. І. // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. – Кривий Ріг, 2019. – Вип. 48. – С. 105–110.
10. Avelectric. URL: <https://avelectric.com.ua/ua/p1084619655-ustanovka-kompensatsii-reaktivnoj.html> (дата звернення: 19.05.2025).
11. Mathworks. Matlab Help Center. URL: https://www.mathworks.com/help/?s_tid=user_nav_help (дата звернення: 26.05.2025).

ДОДАТОК А. Огляд питань безпечної експлуатації основних елементів фотоелектричних станцій

А.1 Охорона праці і техніка безпеки при експлуатації СЕС

Адміністрація підприємства (організації) повинні забезпечити систематичний контроль за дотриманням електромонтерами правил безпеки, застосування запобіжних засобів, спецодягу та інших засобів індивідуального захисту. Посадові особи, які не забезпечують виконання цих вимог, залучаються в установленому порядку до адміністративної або кримінальної відповідальності згідно з чинним законодавством

Електрозахисні засоби і засоби індивідуального захисту, що використовуються електромонтерами при роботах, повинні відповідати вимогам державних стандартів.

Навчання техніці безпеки організовує для всіх робітників, що пройшли ввідний інструктаж.

Перед початком робіт в місцях, де є або може виникнути виробнича небезпека незалежно від характеру виконуваних робіт, що відповідає виконавцю видається наряд-допуск на виконання робіт підвищеної небезпеки.

Особи, які не досягли 18 річного віку, не допускаються в якості електромонтерів та робочих до робіт в електроустановках. Технічне обслуговування являє собою комплекс робіт, що проводив для підтримки в справності електроустановок при використанні їх за призначенням, а також при використанні їх за призначенням, а також при зберіганні і транспортуванні. Вона складається: з повсякденного догляду за електроустановками; контролі режимів їх роботи; спостереження за справним станом; контролем за дотриманням правил технічної експлуатації.

Поточна експлуатація- це проведення робіт, оперативним (оперативно ремонтним) персоналом на закріпленій ділянці під час однієї зміни.

Всі роботи, що проводяться без наряду виконуються за розпорядженням осіб уповноважених на це з оформленням в оперативному журналі; в

Поточної експлуатації з подальшим записом в оперативному журналі.

В основу організації праці електромонтера покладено планово попереджувальний характер технічного обслуговування і ремонту електроустановок із системою оперативно виробничого планування.

При отриманні сигналу про несправності електроустановки електромонтер усуває її і робить огляд.

Керівний технічний працівник (енергетик, майстер) повинен щодня переглядати записи в журналі і вживати необхідних заходів для усунення виявлених несправностей в роботі електрообладнання.

Стан умов праці, при якому виключено вплив на працюючих, різних небезпечних або шкідливих виробничих факторів, прийнято називати безпекою праці.

ДОДАТОК Б. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____