

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

бакалавра

(ступінь вищої освіти)

на тему **«ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ НОВОСАНЖАРСЬКОЇ СЕЛИЩНОЇ
ГРОМАДИ»**

Виконав: студент 2 курсу, групи 201пМЕ

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Рибка Д. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Бороздін М. К.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Шефер О.В.

(прізвище та ініціали)

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
Освітній рівень бакалавр
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
завідувач кафедри автоматки,
електроніки та телекомунікацій

_____ д.т.н., проф. О.В. Шефер
“ ” _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Рибці Денису Віталійовичу

1. Тема проекту (роботи) **«ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ НОВОСАНЖАРСЬКОЇ СЕЛИЩНОЇ ГРОМАДИ»**

керівник проекту (роботи) Бороздін Микола Кирилович, к.т.н., доцент
затверджена наказом вищого навчального закладу від 08.12.2023 року № 1481/1-фа

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 10.06. 2024 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи). Вихідними даними є матеріали зібрані під час проходження переддипломної практики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. Аналіз конрукції, принципу дії та характеристик фотоелектричних джерел. Аналіз електротехнічних комплексів із сонячними фотоелементами та трекінгом. Аналіз особливостей кліматичних умов Новосанжарського району. Моделювання зміни параметрів сонячної електростанції. Побудова математичних моделей фотоелектричної комірки, трифазного інвертора, трифазного трансформатора та профілю освітлення фотоелемента. Моделювання зміни погодних умов, що впливають на вироблення електроенергії фотоелектричними модулями. Аналіз результатів моделювання в пакеті Matlab/Simulink. Загальні висновки та рекомендації.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):
Спектральний розподіл сонячного випромінювання. Вольт – амперна характеристика сонячного модуля. Графік ефективності сонячних елементів та потужності панелей залежно від технології, що використовується. Діаграма інтенсивності інсоляції на території Новосанжарського району. Усереднена кількість годин сонячного світла на день для Новосанжарського району

Полтавської області. Діаграма середньодобової відносної вологості (%) та середньодобовий атмосферний тиск (Па) на території Новосанжарського району. Середньодобова відносна вологість (%), середньомісячна швидкість вітру та середньодобовий атмосферний тиск (Па) на території Новосанжарського району. Схема підключення інвертора відповідно до його номінальної потужності. Модель Matlab / Simulink електротехнічного комплексу з фотоелектричними панелями. Вольт-амперна характеристика фотоелемента, що працює з різним сонячним випромінюванням та за різних робочих температур. Результати моделювання в MATLAB робочої температури сонячного генератора. Залежність робочої температури сонячної панелі від швидкості вітру. Подання математичної моделі трифазного інвертора в Matlab/Simulink. Графік порівняння енергій, отриманої системою стеження за Сонцем та стаціонарною сонячною системою.

7. Дата видачі завдання 01.04.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор №	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
		Дата	Етап	Відсоток	
1	Вступ. Аналіз конструкторської, принципу дії та характеристик фотоелектричних джерел генерації електроенергії.	25.04.24	I	20%	Пл. 1
2	Аналітичний огляд електротехнічних комплексів із сонячними фотоелементами та сучасні можливості трекінгу.	08.05.24		40%	Пл. 2,3
3	Аналіз особливостей кліматичних умов Новосанжарського району та їх вплив на генерацію електроенергії.	23.05.24	II	60%	Пл. 4,5
4	Побудова математичних моделей фотоелектричної комірки, трифазного інвертора, трифазного трансформатора та профілю освітлення фотоелемента.	30.05.24		80 %	Пл. 6
5	Моделювання зміни погодних умов, що впливають на вироблення електроенергії. Аналіз результатів моделювання. Висновки. Формування додатків. Оформлення кваліфікаційної роботи та підготовка графічних матеріалів.	10.06.24	III	100%	Пл. 7,8

Студент _____
(підпис)

Рибка Д. В. _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Бороздін М.К. _____
(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	7
1.1 Аналіз конструкторської та принципу дії фотоелектричних джерел електропостачання.....	7
1.2. Основні характеристики та структури фотоелементів.....	9
1.3. Електротехнічні комплекси із сонячними фотоелементами.....	13
1.4. Геліоелектростанції із сонячним трекінгом.....	16
1.5. Висновок за розділом та постановка завдань.....	22
2. АНАЛІЗ КЛІМАТИЧНИХ УМОВ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ	24
2.1 Аналіз кліматичних умов Новосанжарського району	24
2.2 Моделювання зміни параметрів сонячної електростанції.....	28
2.2.1 Математична модель фотоелектричної комірки.....	32
2.2.2 Теплова модель фотоелектричної комірки	35
2.2.3 Математична модель трифазного інвертора.....	40
2.2.4 Математична модель трифазного трансформатора.....	41
2.2.5 Математична модель профілю освітлення фотоелемента.....	42
2.3 Висновки за розділом.....	45
3 АНАЛІЗ ГЕНЕРАЦІЇ І СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	47
3.1 Моделювання зміни погодних умов, що впливають на вироблення електроенергії фотоелектричними модулями в умовах Новосанжарського району.....	47
3.2 Результати моделювання в пакеті Matlab/Simulink.....	55
3.3 Математичне моделювання двоосової системи стеження за Сонцем.....	56
3.4 Висновки за розділом.....	59
ВИСНОВКИ.....	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	61
ДОДАТКИ.....	62

ВСТУП

Відновлювана енергетика сьогодні показує стрімкий розвиток в усіх країнах, оскільки питання зниження негативного впливу на навколишнє середовище, а також пошук альтернативи вуглеводневому паливу під час виробництва електричної енергії є актуальними. Однак існує ряд факторів, що стримують розвиток. До таких факторів належать низька ефективність, висока собівартість, відсутність новітніх технологій раціонального живлення електроустановок споживачів. У багатьох країнах на державному рівні здійснюється підтримка організацій, компаній, а також приватних осіб, які використовують сонячні електростанції, вітрогенератори, гідроелектростанції та інші.

Найбільшого поширення серед них сьогодні, з урахуванням кліматичних умов України, для вироблення електричної енергії, набули сонячні електростанції. В Україні застосовуються сонячні фотоелектростанції. Однак, незважаючи на те, що країна має величезний потенціал сонячної енергії, ефективність перетворення сонячної енергії на електричну, на даний момент, знаходиться на низькому рівні. Вартість виробництва електроенергії за допомогою фотоелектростанцій є дуже високою.

Основними причинами цієї тенденції є:

- застарілі моделі сонячних батарей та технології, що використовуються в електротехнічних комплексах.

- відсутність системи управління, що враховує зміну таких факторів, як сонячна активність у різну пору року та кліматичні умови (відносна вологість, атмосферний тиск, а також температура навколишнього середовища та сонячне випромінювання), зміна положення сонця протягом дня та характер навантаження.

Застосування систем стеження за Сонцем один із способів підвищення ефективності перетворення сонячної енергії на електричну. Проте, це вимагає комплексного аналізу характеристик регіону, розробки системи управління з урахуванням кліматичних та соціально-економічних умов та забезпечення належної якості електроенергії в системі електропостачання.

Слід враховувати важливий факт проблеми старіння та затінення фотоелектричних панелей, що впливає на ефективність перетворення сонячної енергії. Підвищення ефективності сонячних електростанцій за рахунок застосування систем стеження за Сонцем.

При моделюванні теплової поведінки фотоелектричних систем беруть до уваги лише три кліматичні параметри – температуру навколишнього середовища, сонячне випромінювання та швидкість вітру. Наразі не вирішено низку завдань, що стосуються експлуатації фотоелектростанцій у специфічних умовах України. До них відносяться як кліматичні, так і соціально-економічні умови пов'язані з воєнним станом.

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз конструкції та принципу дії фотоелектричних джерел електропостачання

Сонячна електроенергетика - один із напрямків альтернативної енергетики, що вивчає безпосереднє використання сонячного випромінювання для отримання інших видів енергії. Вона є найпоширенішим видом відновлюваної енергетики з мінімальним впливом на довкілля під час активної фази її використання. Тому необхідно поглиблено провести критичний аналіз електротехнічних комплексів з фотоелектричними системами, їх ефективність та технічні елементи, з яких вони складаються, а також специфічні екологічні фактори кожного географічного регіону України, які впливають на ефективність цих систем [1].

Величина сонячного випромінювання залежить від географічних координат, кліматичних і географічних особливостей, стану атмосфери, висоти Сонця над рівнем моря тощо. Максимальний потік сонячного випромінювання лише на рівні моря на Екваторі дорівнює 1020 Вт/м^2 . Однак слід враховувати, що середньодобове значення потоку сонячного випромінювання змінюється у великому діапазоні [2].

Залежно від способу виробництва електроенергії в установках, що використовують сонячне випромінювання, області їх застосування може бути використаний різний спектр випромінювання. На рис. 1.1 представлено спектральне розподілення сонячного випромінювання. У роботі розглядається лише видима частина спектру сонячного випромінювання, котра бере участь у виробленні електричної енергії. Тому слід зазначити, що інфрачервоне випромінювання також впливатиме на вироблення електроенергії, оскільки випромінювання цього спектру впливає на робочу температуру панелі.

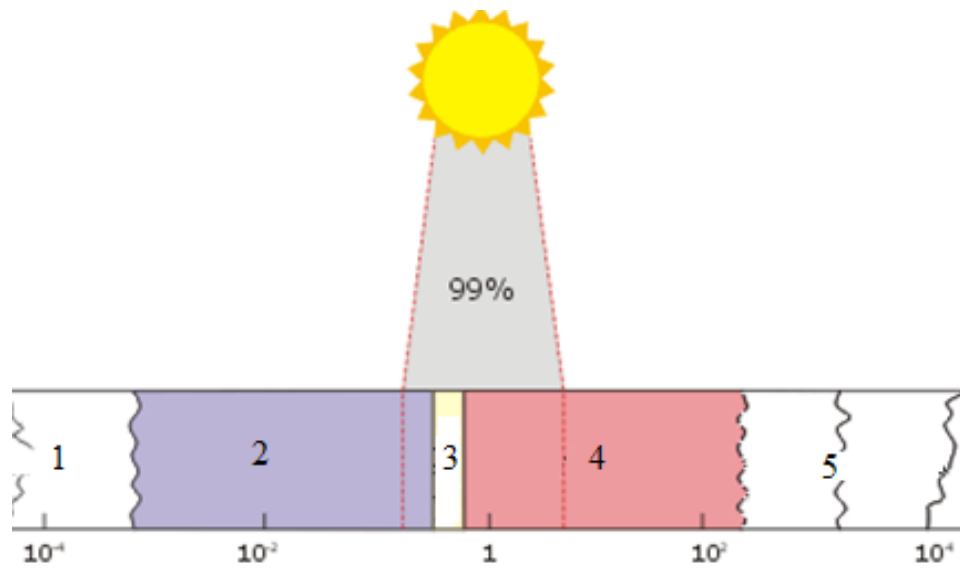


Рисунок 1.1 – Спектральний розподіл сонячного випромінювання:

1- Рентгенівські промені; 2 - Ультрафіолетові промені; 3 - Спектр Видимого випромінювання; 4 – Інфрачервоні промені; 5 - СВЧ-промені

Сонячне випромінювання має свій пік пропускання у видимому діапазоні довжин хвиль від 0,38 до 0,78 мікрометра (μm) електромагнітного. Сонце також випромінює значну кількість енергії в ультрафіолетовій та інфрачервоній областях спектру.

Іррадіацією («прихід сонячної радіації») називається сумарна кількість енергії та характеризує потужність сонячного випромінювання. Одиницею руйнації іррадіації є $\text{Втч}/\text{м}^2$ щодня, чи інший період [3]. Величину іррадіації необхідно знати для розрахунку енергії, що виробляється фотоелектричною установкою. Сонячне випромінювання, що досягає поверхні Землі включає наступні компоненти (рис. 1.2).

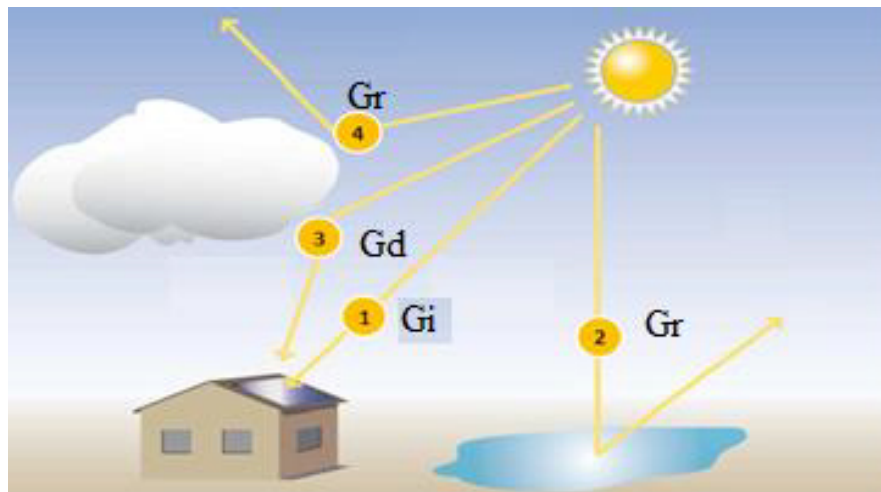


Рисунок 1.2 – Компоненти сонячного випромінювання на поверхні Землі,
 1. G_i – Пряме сонячне випромінювання, 2. G_r – Відбите сонячне випромінювання 3. G_d – Розсіяне сонячне випромінювання

1.2 Основні характеристики та структури фотоелементів

Одним із найбільш поширених матеріалів, що використовуються в конструкції сонячних елементів, є кремній, який при спеціальній хімічній обробці стає напівпровідниковим матеріалом, що є найважливішою фізичною властивістю сонячних елементів. Для вивчення фізичного та хімічного складу напівпровідників необхідне розуміння фотоелектричного ефекту. Сьогодні існує кілька видів сонячних елементів, з яких, у тому числі складаються сонячні батареї. Відмінності цих модулів у технології та матеріалах, що застосовуються у їх виготовленні. На даний момент існують три типи батарей, що розділяються за матеріалом основи елемента - плівкові, кремнієві та аморфні.

Структура сонячного фотоелектричного модуля полягає у сукупності безлічі окремих сонячних фотоелектричних елементів (СФЕ), так званих осередків. Усі СФЕ залежно від необхідних вихідних значень струму та напруги з'єднуються послідовно та паралельно.

Сонячний фотоелектричний елемент - це елемент, що перетворює енергію сонячного випромінювання на електричну енергію на підставі внутрішнього фотоелефекту.

На вихідні параметри впливають величина сонячного випромінювання та температура. Напруга на виході СФЕ залежить від температури, тоді як струм на виході залежить від інтенсивності сонячного випромінювання. При збільшенні інтенсивності світлового потоку в 2 рази струм короткого замикання СФЕ збільшується в 2 рази, тоді як напруга холостого ходу незначно змінюється.

Температурний коефіцієнт враховує різницю температур і дорівнює порядку кількох міліампер на градус Цельсія. Сонячний елемент є головним будівельним блоком фотоелектричної системи.

Окрема комірка зазвичай досить мала і виробляє потужність близько 1 або 2 Вт. Для збільшення вихідної потужності сонячних осередків вони повинні бути з'єднані разом, щоб сформувати більші секції - модулями. Модулі, у свою чергу, можуть бути з'єднані у більші одиниці, які називаються масивами, які можуть бути пов'язані між собою для збільшення потужності. При послідовному з'єднанні осередків або модулів вихідна напруга може бути збільшена. З іншого боку, для досягнення більшого значення вихідного струму, комірки чи модулі необхідно підключити паралельно (рис. 1.3).

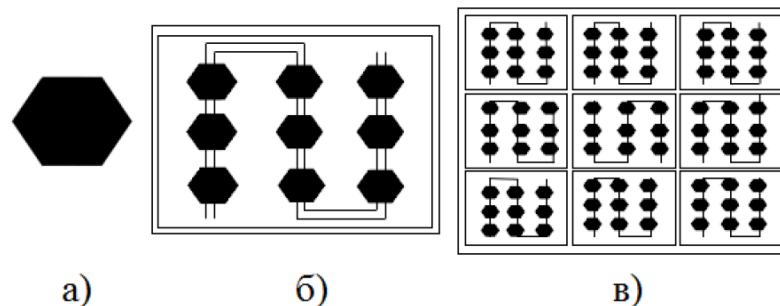


Рисунок 1.3 – а) Сонячна комірка, б) Сонячний модуль, в) Сонячна батарея

Зображення вольт-амперної кривої сонячного модуля показано на рис. 1.4

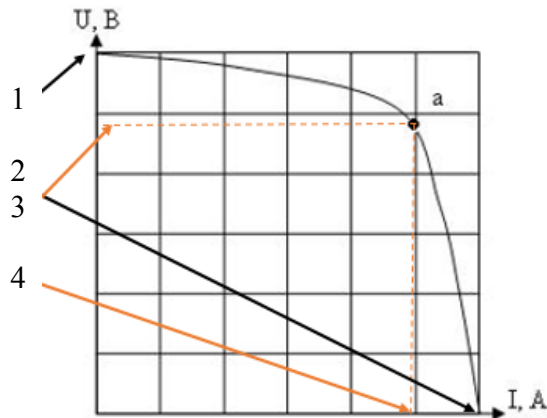


Рисунок 1.4 – Вольт – амперна характеристика сонячного модуля де: 1- напруга на затискачах (V); 2 – струм короткого замикання за нормальних умов роботи (A), 3- напруга за умов максимальної потужності (V); 4 – струм максимальної потужності (A).

Математична модель фотоелектричного елемента будується на основі класичної еквівалентної схеми заміщення із зосередженими параметрами, що включає генератор фотоструму, діод, шунтуючий опір (R_{sh}), послідовний (R_s) опір [3]. Щоб отримати задовільну точність моделі, необхідно мати задані значення внутрішніх опорів фотоелементів.

Сьогодні розвиток технологій забезпечує появу значних варіацій фотоелектричних батарей.

На рис. 1.5 подано основні типи сонячних модулів [4].

Найпоширенішими сьогодні сонячними модулями є: монокристалічні (ККД до 25%), полікристалічні (ККД до 20%) та модулі з аморфного кремнію (ККД не більше 9%). За вартістю виробництва найдорожчими є монокристалічні, потім йдуть полікристалічні і найдешевшими є модулі з аморфного кремнію.



Рисунок 1.5 – Типи сонячних модулів, які найбільше використовуються сьогодні

На рис. 1.6 показано дослідження, проведене EnergyTrend у 2022 році, де показано порівняння існуючих типів технологій та їх ефективності.



Рисунок 1.6 – Графік ефективності сонячних елементів та потужності панелей залежно від технології, що використовується

Вивчення різних частин, що становлять фотоелектричний модуль, а також їх електричних характеристик є важливим кроком у проведенні математичного моделювання в програмі Matlab. Це дозволить знати і краще розуміти залежність електричних змінних від кліматичних параметрів (таких як

температура навколишнього середовища, сонячне випромінювання, швидкість вітру та ін.), на які піддається сонячний модуль.

1.3 Електротехнічні комплекси із сонячними фотоелементами

Існує кілька варіантів типових сонячних електростанцій. Принцип їх функціонування залежить від технології отримання електричної енергії із сонячного випромінювання. Найбільш поширеними є фототермічні та фотоелектричні установки. Отже необхідно розглянути всі види перетворювачів, їх особливості та технічні параметри, для того щоб виділити максимально продуктивні установки або установки з найбільшою величиною ККД у процесі перетворення сонячного випромінювання в електрику. Сонячну енергію можна перетворювати на інші види енергії різними способами. Сучасні технології включають параболічні концентратори, сонячні параболічні дзеркала та геліоенергетичні установки баштового типу [3]. Сонячні параболічні концентратори: Сонячні системи з параболічними концентраторами (рис. 1.7) є найпоширенішим видом сонячних електростанцій. Ця технологія є найбільш економічно витратною, тому що для неї характерна низька концентрація сонячного випромінювання.

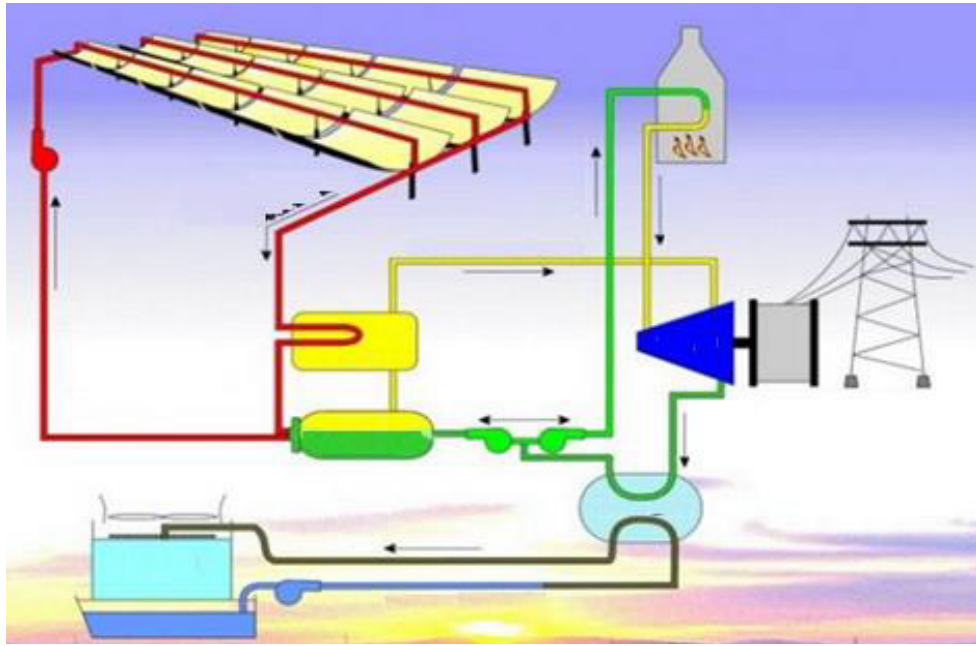


Рисунок 1.7 – Параболічні концентратори сонячного випромінювання

Сонячні електростанції баштового типу (рис. 1.8) служать для виробництва електричної енергії у великих масштабах. Відмінною особливістю цієї технології є застосування геліостатів.

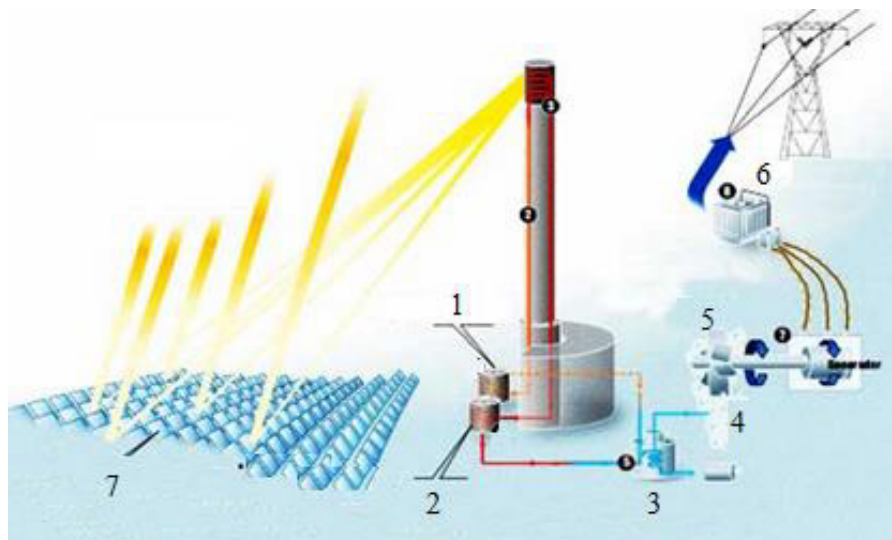


Рисунок 1.8 – Сонячна електростанція баштового типу. 1 - Холодні солі, 2 - Гарячі солі, 3 - Теплообмінник, 4 - Водяна пара, 5 - Турбіна, 6 - Трансформатор

Сонячні фотоелектростанції (ФЕС): Основним компонентом ФЕС для ФЕМ, що відповідає за пряме перетворення сонячної енергії на електричну. Залежно від потужності ФЕС та способу підключення до мережі можуть включати до свого компонентного складу – акумуляторні батареї, перетворювачі, контролери та інші складові. Такі установки призначені для отримання електроенергії із сонячних променів з її подальшим резервуванням або подачею до мережі.

На рис. 1.9 представлено найбільш поширену структурну схему ФЕС – автономного енергозабезпечення об'єкта. Інші варіанти схем передбачають комутацію ФЕС з мережею та/або паралельну роботу ФЕС з іншим джерелом електроживлення.

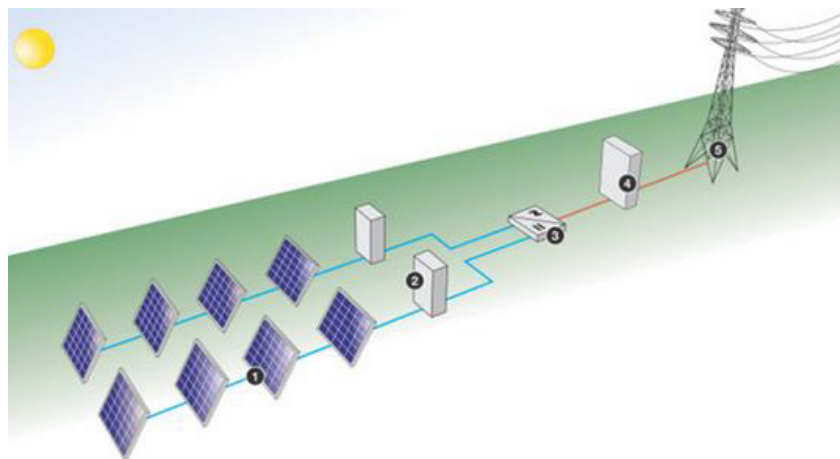


Рисунок 1.9 – Сонячна електростанція (ФЕС), 1 – фотоелектричний генератор, 2, 4 – електричні щити, 3 – інвертор, 5 – електрична мережа автономного об'єкта

Перевагою ФЕС є мінімальне обслуговування та рідкісний ремонт. Сучасні сонячні панелі здатні виробляти електроенергію навіть в умовах короткого світлового дня та малої сонячної активності.

1.4 Геліоелектростанції із сонячним трекінгом

Плоскі фотоелектричні модулі (ФЕМ), що застосовуються на поверхні Землі, перетворюють пряме та розсіяне сонячне випромінювання у видимій частині спектру. ФЕМ генерують електроенергію незалежно від орієнтації їхньої поверхні на Сонці, однак, з різною ефективністю, тому для максимізації електричної енергії, що отримується від прямої складової сонячного випромінювання, застосовуються системи стеження за Сонцем [3]. Сонячні трекери почали застосовувати, коли фотоелектричні системи стали використовуватися для генерації великої кількості електроенергії. Насамперед, вони використовуються за умови великої площі поверхні ФЕМ (полів), тому що таким чином збільшується виробництво електроенергії фотоелектричними панелями на рахунок того, що панелі завжди розташовуються максимально перпендикулярно до сонячних променів. В даний час існують різні технології, які застосовуються для розробки систем стеження за Сонцем, які гарантують підвищення ефективності уловлювання сонячних променів. Це призводить до збільшення вироблення електричної енергії всім комплексом. На рис. 1.10 показано різні моделі, розроблені різними виробниками.

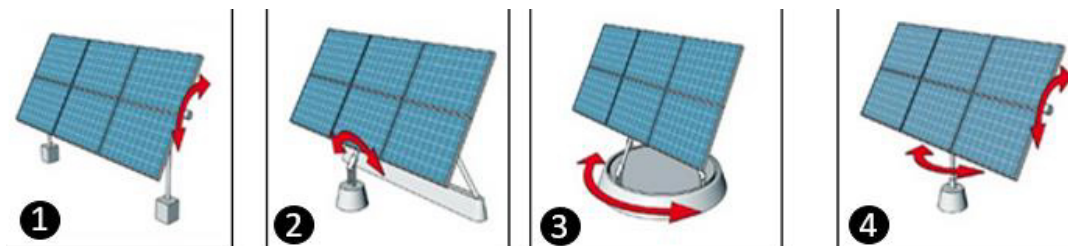


Рисунок 1.10 – Типи систем стеження за Сонцем

У рамках проведених досліджень системи стеження були оцінені з точки зору їх співвідношення витрат і вигод у процесі фотоелектричної генерації, і

повідомляється про збільшення генерації до 35% щодо використання фіксованих панелей через те, що у цих послідовників дві осі, фотоелектричні модулі завжди перпендикулярні Сонцю.

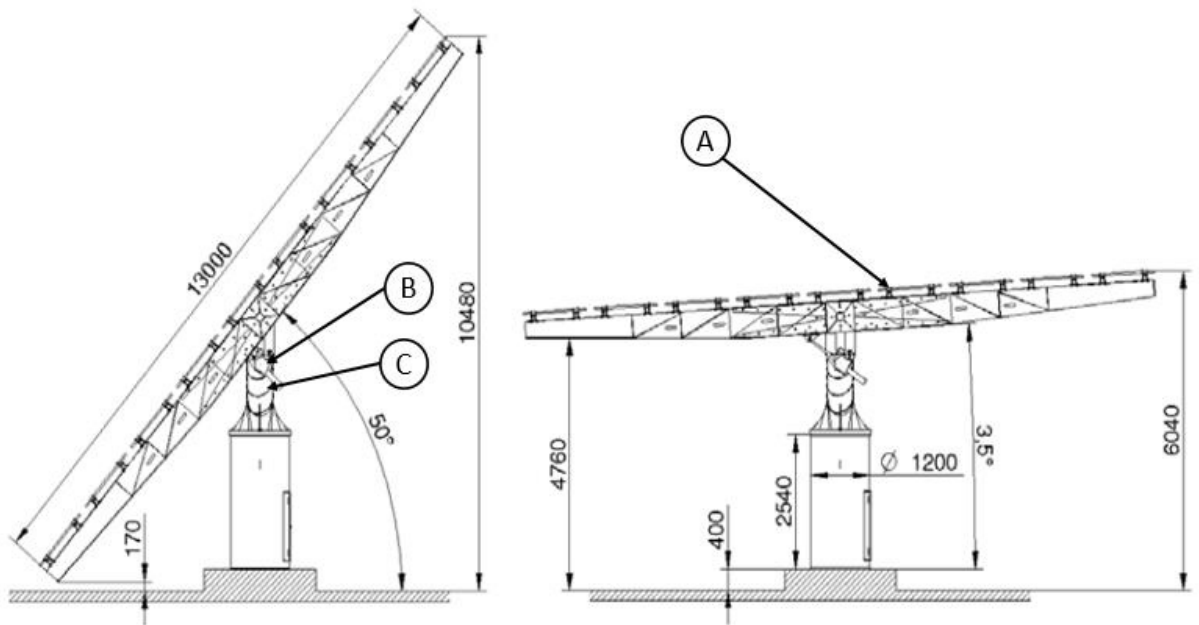


Рисунок 1.11 – Частини та компоненти двоосьового сонячного трекера (двоосьовий трекер 30 кВт)

На рис. 1.11 показані основні частини, що становлять сонячний трекер з двома осями, де А – фотогальванічний генератор, що складається із з'єднаних сонячних панелей, точка В показує двигун, який відповідає за рух шляхом, який описує Сонце, а в точці С – двигун, який керує висотою, так що опромінення приймається перпендикулярно будь-якої пори року. Кут піднесення становить від 15 до 90°, а швидкість обертання 0,52 - 0,62°/с. В даний час на міжнародному ринку існують різні виробники та моделі сонячних трекерів. У таблиці 1.1 наведено деякі приклади поточних витрат за ці системи залежно від моделі. Дані, подані у таблиці 1.1, відповідають даним на травень місяць 2024 року.

Таблиця 1.1

Витрати на міжнародному ринку сонячних трекерів за моделями

Тип	Вартість, \$	Ефективність, %
1	0.08 ВА – 0.14 ВА	10% - 25 %
2	0.08 ВА – 0.14 ВА	10% - 25 %
3	-	10% - 20 %
4	0.19 ВА – 0.25 ВА 0.40 ВА – 0.50 ВА*	30% - 45 %

* Двохосні сонячні системи стеження з GPS – супутниковою системою навігації

Основними виробниками сонячних трекерів є такі компанії як: NEXTracker, ArrayTechnologies, PV Hardware, ArctechSolar, Soltec, NClave, ConvertItalia, STiNorland, GameChangeSolar, SunPower. Компанія NEXTracker лідирує у рейтингу виробників фотоелектричних трекерів на світовому ринку. Постачання даної компанії на сьогоднішній день становлять 29% від загального обсягу поставок сонячних трекерів. Іншим великим виробником останніх два роки є компанія ArrayTechnologies, далі йдуть PV Hardware (PVH), ArctechSolar і Soltec займає п'яте місце в даному рейтингу.

Рівняння визначення ефективності систем моніторингу в порівнянні зі стаціонарними системами:

$$G_{an} = (E_{dm} - E_{df} / E_{df}) * 100, \quad (1.1)$$

де: E_{dm} – Електроенергія, що доставляється мобільною системою, E_{df} – Електроенергія стаціонарної системи, G_{an} – приріст енергії.

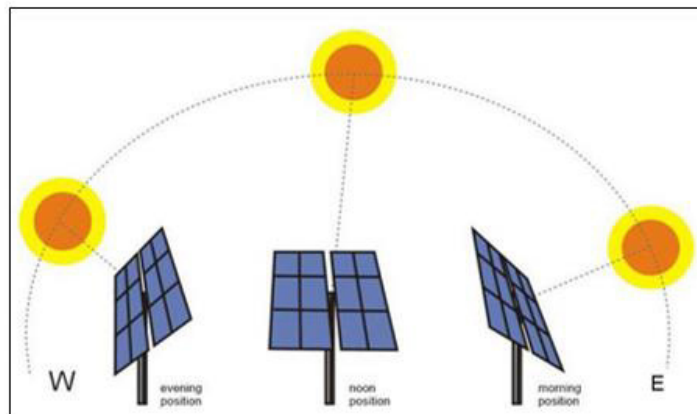


Рисунок 1.12 – Сонячна слідкуюча система

Кути, які визначають рух сонячного трекера в горизонтальному русі (α) та вертикальному русі (γ), рівні:

$$\alpha = \sin^{-1}(\cos(\varphi) * \cos(\delta) * \cos(w) + \sin(\delta) * \sin(\varphi)), \quad (1.2)$$

$$\gamma = \tan^{-1}(\sin(w) \tan(\delta) * \cos(\varphi) - \sin(\varphi) * \cos(w)), \quad (1.3)$$

де: δ - кут сонячного відмінювання ($^{\circ}\text{F}$); w - кут сонячного часу ($^{\circ}\text{F}$); α – сонячний кут висоти ($^{\circ}\text{F}$); γ - кут Asimut ($^{\circ}\text{F}$); φ – географічна широта місця ($^{\circ}\text{F}$).

Вивчення різних технологій сонячних електростанцій, що існують в даний час, дає достатню інформацію, необхідну для розуміння різних конструкцій та компонентів, що становлять ці системи. Необхідно знати параметри кожного з електричних та механічних елементів, оскільки дана інформація впливає на прийняття технічних рішень, які дозволяють інженерам та технікам ремонтувати їх у разі збоїв, а також підвищувати їхню ефективність, забезпечувати технічне обслуговування та продовжувати термін служби комплексів.

Сонячна енергія представляється як ефективна та економічна альтернатива порівняно з іншими традиційними формами виробництва електричної енергії. Все це збільшило потребу у ширшому використанні сонячної енергії. У будь-якому випадку перша умова, якій повинна відповідати система використання сонячної енергії, – це збирання максимально можливої кількості енергії в даному місці. Сьогодні наукова та інженерна спільнота шукає альтернативи викопним видам палива, для яких вона використовує відновлювані джерела енергії. Станом на кінець 2022 рр. в систему енергопостачання України було введено 6320 МВт. Частка ФЕС на початок 2024 року становить близько 4,8 % від загальної генерації України. Однак у багатьох із цих фотоелектричних установок (ФЕС) у країні очікувані рівні енергії не виробляються відповідно до оцінок, отриманих проектними компаніями. Основною причиною такої різниці між проектними даними та реальними є низька ефективність компонентів, що входять до складу ФЕС.

Було виявлено, що сонячні панелі мають середнє відхилення потужності – 8%, коли виробник цих сонячних модулів у даних вказав $\pm 3\%$. Сонячна електростанція потужністю 2,5 МВт має 10400 сонячних панелей 240 Вт з номінальним відхиленням потужності $\pm 3\%$ і, згідно з результатами дослідження, середнє відхилення потужності сонячних панелей становить – 8%. Це означає, що реальна потужність сонячного генератора на електростанції 2,5МВт обмежена 2,3 МВт, що приблизно на 20 кВт менше через цю проблему. Однак, ефективність перетворення сонячної енергії на електричну, на даний момент, знаходиться на низькому рівні. Вартість виробництва електроенергії за допомогою ФЕС є дуже високою, проте останніми роками спостерігається тенденція зниження вартості.

Широко поширені два шляхи максимізації електроенергії, що отримується від фотоелектричної установки:

- покращення структури фотоелектричної панелі, спрямоване на підвищення її продуктивності;
- збільшення кількості сонячного випромінювання, що вловлюється панеллю.

Для досягнення найкращого результату при застосуванні другого способу площа фотоелектричної панелі повинна залишатися перпендикулярною до випромінювання джерела світла. Для цього у фотоелектричних системах використовуються системи стеження за сонцем. Сьогодні, фотоелектричні панелі мають типовий ККД між 12% та 25% та приблизну продуктивність у діапазоні 120 - 420 Вт/м² залежно від ефективності фотоелектричної панелі.

Використання систем сонячного стеження на сонячній електростанції електричного комплексу дозволить підвищити надійність та ефективність отримання електроенергії. З урахуванням сказаного вище, метою даної алврської роботи є підвищення виробництва електроенергії, що виробляється за допомогою ФЕС із застосуванням систем стеження та з урахуванням кліматичних та соціально-економічних умов підвищення якості електроенергії її споживачів.

Фотоелектричні установки на сонячній енергії, підключені до електричної мережі - це установки, в яких енергія, що генерується, безпосередньо надходить в електричну мережу. Цей тип установки сонячної енергії працює як електростанція для електроенергії. Гідроенергетична компанія відповідає за експлуатацію та обслуговування сонячних електростанцій на всій території України.

На рис. 1.13 показано принципову схему електротехнічного комплексу.

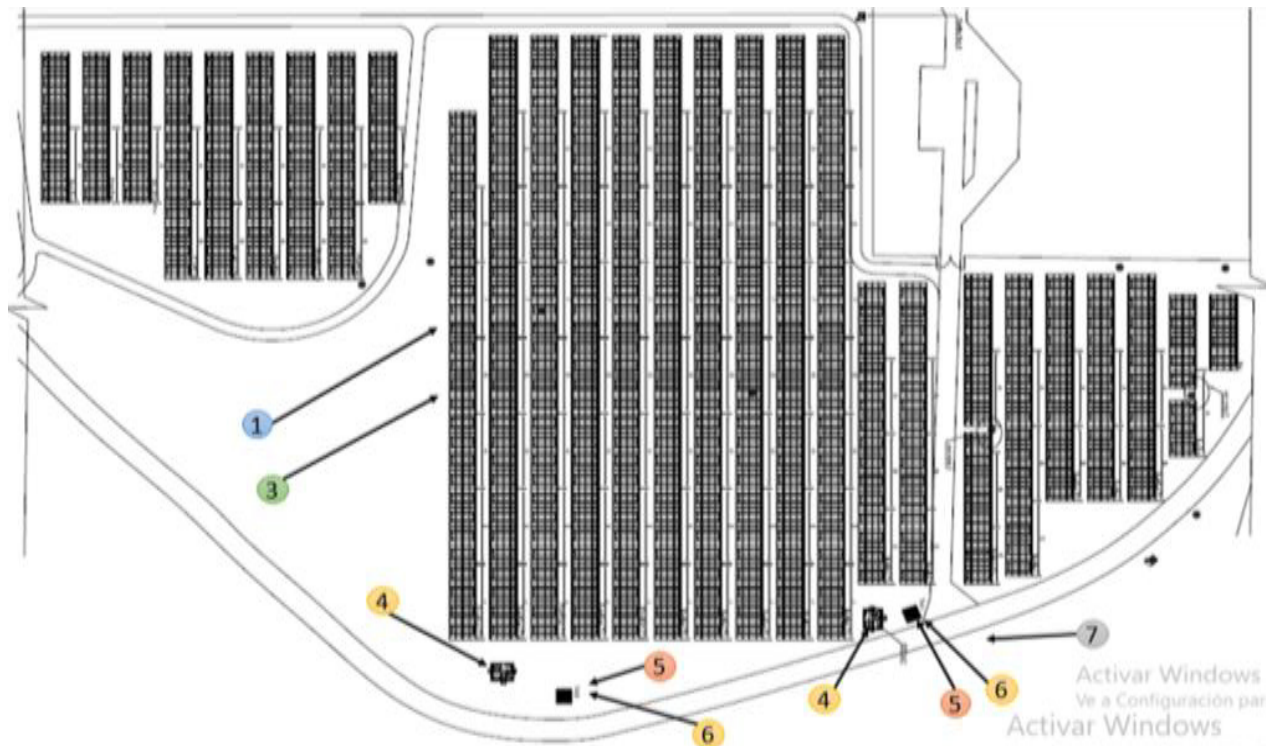


Рисунок 1.13 – Структура фотоелектричної станції: 1- Сонячний генератор. 2. Панелі електричних з'єднань між генератором та інвертором. 3. Трифазні інвертори. 4. Загальна панель розподілу. 5. Трифазні трансформатори. 6. Редукційна основна підстанція.

1.5 Висновки за розділом та постановка завдань

Сонячне випромінювання, що досягло поверхні Землі, залежить від багатьох факторів. Насамперед від широти та довготи місцевості. Крім того, значення сонячної радіації залежить від кліматичних та географічних особливостей, стану атмосфери, висоти Сонця над рівнем моря тощо.

На ділянці площею 17,7 га у Новосанжарському районі Полтавської області функціонує сонячна фотоелектрична станція потужністю 8 МВт.

На поточному етапі підвищення енергоефективності зазначеної станції, необхідно реорганізувати технологічні процеси за рахунок використання

сучасного обладнання, схем підключення та методів, що відповідають вимогам енергоефективності.

Використання ефективніших фотоелектричних елементів або систем стеження у сонячній електростанції підвищить надійність, ефективність та виробництво енергії в районі. Але є низка завдань, які необхідно виконати для підвищення ККД сонячних генераторів фотоелектричної станції потужністю 8 МВт.

Мета роботи – підвищення енергоефективності роботи електротехнічного комплексу, що містить сонячну електростанцію з урахуванням кліматичних та технологічних.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати існуючі підходи до формування структури електротехнічного комплексу, що містить сонячну електростанцію.

2. Визначити комплекс кліматичних факторів, що враховуються при оцінці величини енергії, що генерується підстанцією.

3. Здійснити факторний аналіз кліматичних змінних умов Полтавської області.

4. Розробити математичні та комп'ютерні моделі електротехнічного комплексу, що включає сонячну електростанцію, що дозволяють оцінити величину енергії, котра генерується, залежно від її структури та параметрів системи генерації.

5. Сформувати функцію, що відображає максимально можливе значення генерації електроенергії в залежності від обмежень щодо кліматичних можливих та технічних факторів.

6. Перевірити адекватність розробленого підходу до проектування електротехнічного комплексу на комп'ютерній моделі.

2 АНАЛІЗ КЛІМАТИЧНИХ УМОВ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

2.1 Аналіз кліматичних умов Новосанжарського району

Для подальшого аналізу значущості виявлених факторів, що впливають на ефективність роботи сонячної електростанції, необхідно здійснити аналіз їх характеристик. Слід зазначити, що до зазначених факторів належать: сонячне випромінювання, вологість, тиск, температура довкілля та швидкість вітру.

Для оцінки можливості використання сонячної енергії та ефективність використання необхідно проводити комплексний аналіз даних про сумарну сонячну енергію в регіоні. Для цього необхідно провести дослідження радіаційного режиму в часі з подальшим виробленням тепла або електроенергії геліоустановкою за один місяць, сезон або за один рік з подальшою оцінкою її техніко-економічних показників. Для аналізу інсоляції використовують дані в режимі реального часу за допомогою глобальних супутникових систем, кліматичні атласи, а також польові виміри сонячної радіації безпосередньо на об'єкті дослідження.

Як відомо, величина сонячного випромінювання залежить від широти і змінюється від 6.5 кВтг/м² на екваторі до 4 кВтг/м² на полюсі. На рис. 2.1 показано інтенсивність сонячного випромінювання в Новосанжарському районі за засобами моделювання SUNY, програми яка має високу просторову роздільну здатність (1 x 1 км) та отримана з супутникових зображень [6].

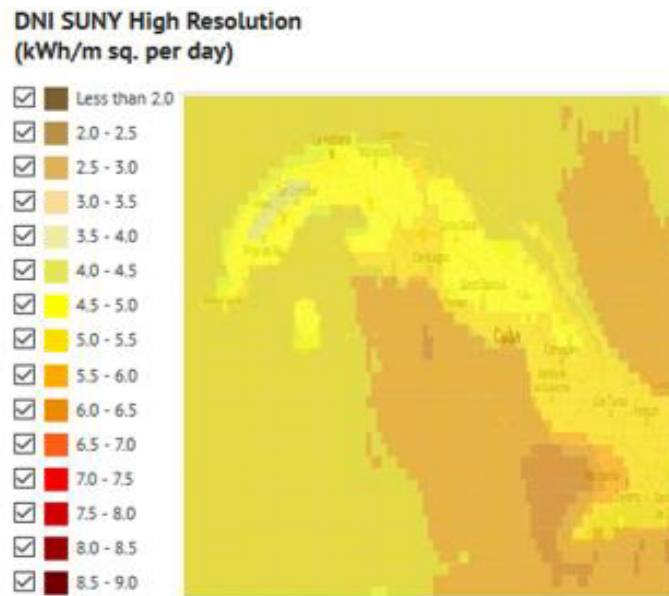


Рисунок 2.1 – Інтенсивність інсоляції на території Новосанжарського району

Величина сонячного випромінювання, яке посідає горизонтальну поверхню площею 1 м^2 , у літні місяці становить у середньому 6 кВтг/м^2 (рис. 2.2).

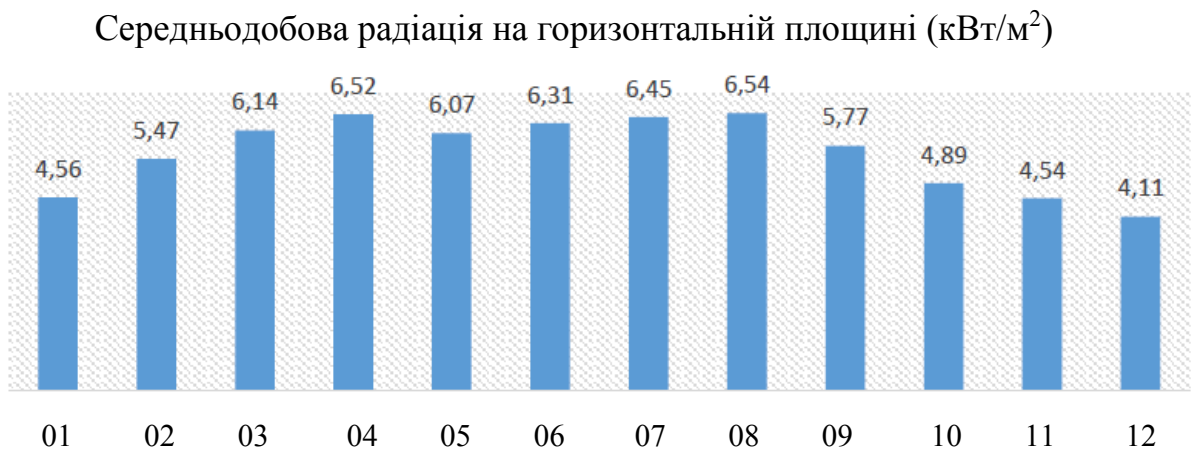


Рисунок 2.2 – Середньодобова радіація на горизонтальній площині (кВт/м²) за річний сонячний цикл

Середньодобові дані про сонячну радіацію на території Новосанжарського району можуть досягати абсолютних мінімальних значень 4 кВтг/м^2 та абсолютних максимальних значень $6,5 \text{ кВтг/м}^2$. На рис. 2.3 показано зміну кількості годин сонячного світла на день для досліджуваного Новосанжарського району Полтавської області.

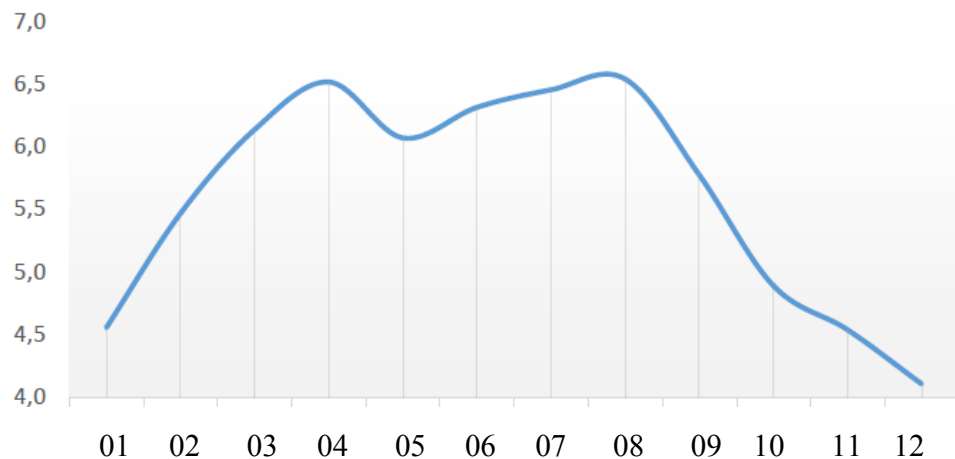


Рисунок 2.3 – Усереднена кількість годин сонячного світла на день для Новосанжарського району Полтавської області

Таким чином, було визначено діапазон зміни інсоляції за місяцями. Отримані результати будуть використані у подальших дослідженнях.

За даними центру (Prediction of worldwide energy resources) [6] кліматичні значення середньої відносної вологості та середнього атмосферного тиску для кожного місяця на території Новосанжарського району Полтавської області показані на рис. 2.4.

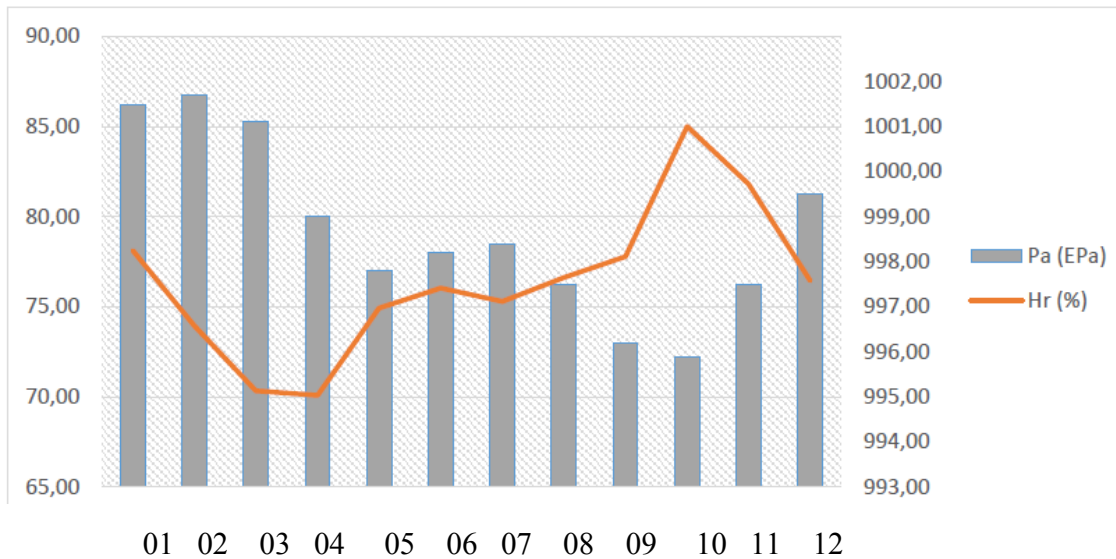


Рисунок 2.4 – Середньодобова відносна вологість (%) та середньодобовий атмосферний тиск (Па) на території Новосанжарського району Полтавської області

Дані про середньомісячний атмосферний тиск говорять про те, що абсолютні мінімальні значення дорівнюють 975 Па і абсолютні максимальні значення дорівнюють 1002 Па. Таким чином, було визначено діапазон характерної зміни параметрів вологості та тиску.

За даними того ж центру [6] були отримані кліматичні значення середньої температури та середньої швидкості вітру для кожного місяця.

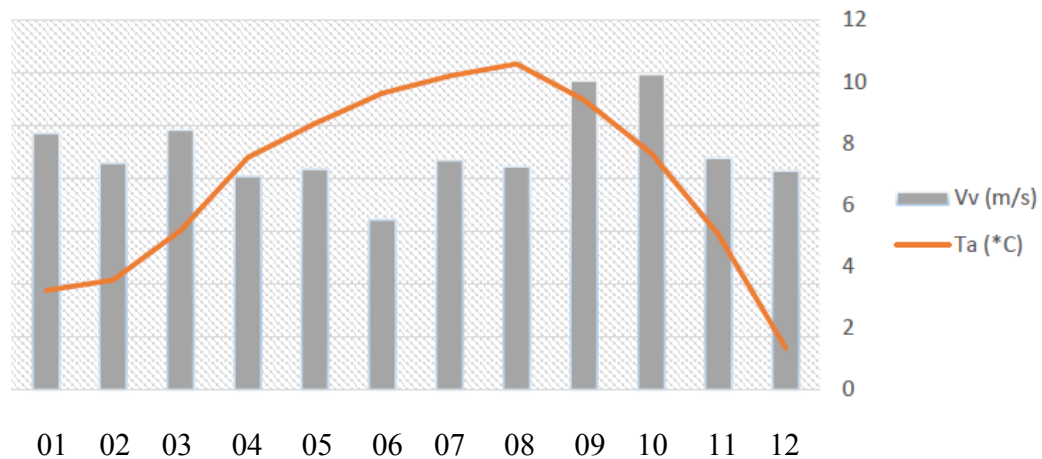


Рисунок 2.5 – Средньомісячна швидкості вітру (м/с)

Дані про середньомісячну температуру навколишнього середовища свідчать, що абсолютне мінімальне значення становить -18°C , тоді як максимальна абсолютна температура дорівнює 38°C . На підставі аналізу даних про середньомісячну швидкість вітру отримано значення мінімальних значень 0.5 м/с та абсолютних максимальних значень 10 м/с .

Таким чином, у роботі виявлено діапазони характерних змін щодо місяців інсоляції, відносної вологості, тиску, температури навколишнього середовища та швидкості вітру для умов Новосанжарського району Полтавської області. Очевидно, що виявлені параметри мають свої відмінні риси, що вплине на хід подальших досліджень.

2.2 Моделювання зміни параметрів сонячної електростанції

Фотоелектричні установки на сонячній енергії, підключені до електричної мережі - це енергетичні установки, в яких енергія, що генерується, безпосередньо надходить в електричну мережу. Цей тип установки сонячних генераторів працює як електростанція виробництва електроенергії.

Основним недоліком систем, пов'язаних із генерацією енергії від сонця, є те, що сонячні характеристики є функцією падаючого сонячного випромінювання у поточний момент часу. Отже, зареєстровані значення виробництва електроенергії варіюватимуться залежно від часу доби, пори року та погоди.

Загальний вигляд фотоелектричної станції Новосанжарського району Полтавської області показано на рис. 2.6. Показано етапи виробництва електроенергії на фотоелектричній електростанції у Новосанжарському районі Полтавської області.

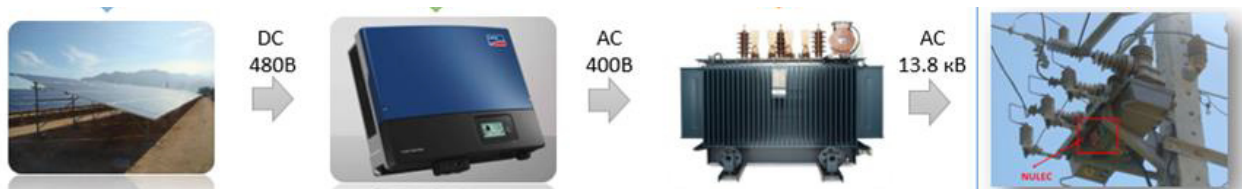


Рисунок 2.6 – Етапи генерації фотоелектричної електростанції в провінції Новосанжарського району Полтавської області

Фотоелектрична електростанція Новосанжарського району Полтавської області наразі має 10400 фотоелектричних панелей (ДСМ-240-С), з'єднаних послідовно та паралельно, для того щоб утворити ряди сонячних панелей, що складають сонячний генератор станції. Кожна секція сонячного генератора (всього 130) складається з 4 паралельних струн із 20 сонячних панелей, з'єднаних послідовно. На рис. 2.7 показані панелі, що використовуються у фотоелектричній електростанції, NUMEN SOLAR моделі ДСМ-240-С.



Рисунок 2.7 – Фотоелектричний генератор електростанції
Новосанжарського району Полтавської області

Інвертори використовуються для перетворення постійного струму від акумуляторів або сонячних модулів на змінний струм. У з'єднаних із мережею системах інвертори приймають енергію від сонячних модулів і перетворюють її на змінний струм, які подається в мережу.

String інвертори призначені для роботи з кількома модулями в одному або кількох ланцюжках. Це найпоширеніший тип мережевих інверторів. На цьому етапі постійний струм, що генерується сонячними батареями, перетворюється на змінний струм для передачі на трансформатор.

Типи інверторів на інших об'єктах: а) Використовується для встановлення потужністю понад 10 кВт. б) Використовується в установках середньої потужності від 3 до 10 кВт. с) Використовується у малопотужних установках від 50 до 400 Вт. На рис. 2.9 показано схему підключення інвертора:

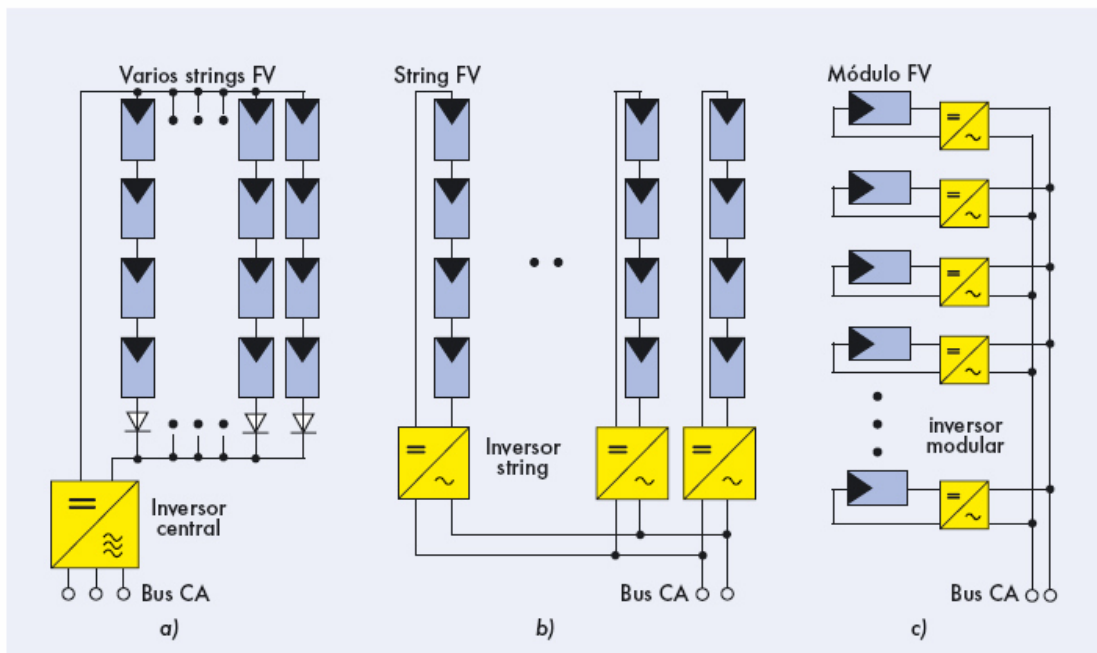


Ilustración 2: Representación esquemática de una instalación fotovoltaica, que está unida con distintas topologías:
 a) inversores Centrales b) inversores String c) inversores con módulos integrados

Рисунок 2.8 – Підключення інвертора відповідно до його номінальної потужності, а) Центральний інвертор, в) струнний інвертор, с) модульний інвертор

Перетворення напруги здійснюється за допомогою трифазного трансформатора, первинна обмотка трансформатора з'єднана в трикутник, а вторинна в зірку з ізольованою нейтраллю.

На рис. 2.9 показано точку електричного з'єднання фотоелектричної електростанції у Новосанжарському районі Полтавської області з централізованою мережею АТ Полтаваобленерго.

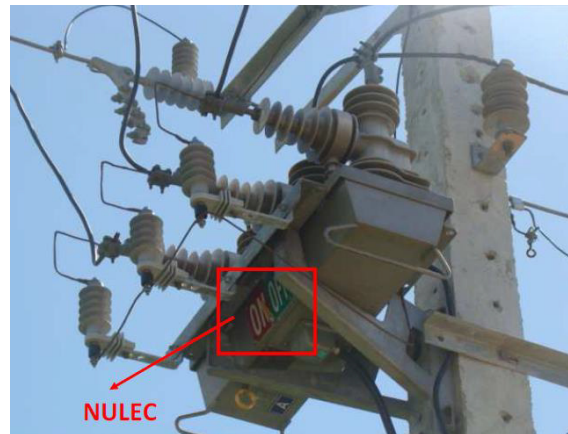


Рисунок 2.9 – Точка з'єднання між фотоелектричною централлю та електричною мережею АТ Полтаваобленерго

Усі зазначені вище пристрої повинні бути змодельовані з метою подальшого вирішення поставлених у роботі завдань.

2.2.1 Математична модель фотогальванічної комірки

Фотогальванічна комірка є основним будівельним блоком фотоелектричної системи. Окрема комірка зазвичай досить мала і виробляє потужність близько 1 або 2 Вт. Для збільшення вихідної потужності сонячних осередків їх з'єднують послідовно або паралельно, щоб сформувати більші секції - модулі. Модулі, у свою чергу, можуть бути з'єднані у більші одиниці, які називаються масивами, які можуть бути пов'язані між собою для збільшення потужності. При послідовному з'єднанні модулів вихідна напруга може бути збільшена. З іншого боку, для досягнення більшого значення вихідного струму, комірки чи модулі необхідно підключити паралельно.

Математична модель фотоелектричного елемента представлена на рис. 2.10

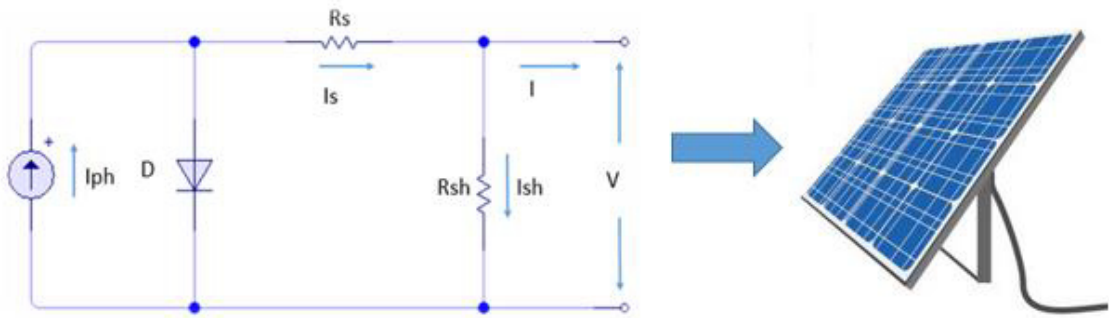


Рисунок 2.10 – Еквівалентна схема сонячної батареї: R_{sh} – шунтуючий опір, R_s – послідовний опір, D – діод

Відношення між струмом та напругою еквівалентної схеми можна знайти, порівнюючи поточне значення I_{ph} і струм діода I_d , тоді робочий струм I буде наступним:

$$I = \frac{I_{sc} \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) - V_{oc} \cdot \left(\frac{B}{A}\right)}{1 - \frac{B}{A}} \cdot \frac{G}{G_{stc}} - \left(\frac{I_{sc} \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) - V_{oc} \cdot \left(\frac{B}{A}\right)}{A - B} - \frac{V_{oc}}{A \cdot R_{sh}} \right) \cdot \left(e^{\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot V_T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}}; \quad (2.1)$$

$$A = e^{\frac{V_{oc}}{n \cdot V_T}} - 1; \quad (2.2)$$

$$B = e I_{sc} \cdot R_s / e^{n \cdot V_T} - 1; \quad (2.3)$$

$$I_{sc} = I_{scm} \cdot N_{cp} + CTI \cdot (T_c - T_{stc}); \quad (2.4)$$

$$V_{oc} = V_{ocm} - 0.0023 \cdot (T_c - T_{stc}) \cdot N_{cs}; \quad (2.5)$$

$$V_t = k \cdot (t_c + 273) / q \cdot N_{cs}, \quad (2.6)$$

де: R_s – послідовний опір (Ω); R_{sh} - паралельний опір (Ω); n -фактор ідеальності; I_{sc} – струм короткого замикання за нормальних умов роботи (А); V_T – напруга теплова діодна (mV); V – робоча напруга (V); I – робочий струм (А); V_{oc} – напруга розімкнутого ланцюга за стандартної тестової умови (V); CTI – температурний коефіцієнт струму короткого замикання; G_{stc} – сонячне випромінювання за нормальних умов роботи ($Вт/м^2$); G_{hi} – сонячне випромінювання ($Вт/м^2$); NCS – кількість сонячних елементів у серії у сонячному модулі (Ω); NCP – кількість сонячних елементів паралельно у сонячному модулі (Ω); t_c – температура батареї ($^{\circ}C$); t_{stc} – температура батареї за стандартних тестових умов ($25^{\circ}C$); k – Постійна Больцмана $1.381 \cdot 10^{-23}$ (Дж/К); q – заряд електрона $1.6 \cdot 10^{-19}$ (К); n - Коефіцієнт ідеальності діода (1~2).

Опір, що відповідає еквівалентній схемі фотоелектричної панелі, розраховується так:

$$R_s = (1 - ff/ff_0); \quad (2.7)$$

$$R_{sh} = ff_0 * (V_{oc}/V_t + 0.7) / (1 - ff/ff_0) * V_{oc}/I_{sc}; \quad (2.8)$$

$$ff_0 = V_{oc} / V_t - \ln(V_{oc} / V_t + 0.72) * V_{oc} / V_t + 1; \quad (2.9)$$

$$ff = V_{mpp} * I_{mpp} / V_{oc} * I_{sc}, \quad (2.10)$$

де: ff – фактор заповнення, наданий виробником, ff_0 – Ідеальний коефіцієнт заповнення пристрою, V_{mpp} – напруга в точці максимальної потужності вольт-амперної фотоелектричної панелі (V), I_{mpp} – струм в точці максимальної потужності фотоелектричної панелі (А).

Отримані рівняння необхідні для одержання залежності впливу метеорологічно змінних параметрів на характеристики сонячної панелі.

2.2.2 Теплова модель фотоелектричної панелі

В результаті проведеного аналізу для подальшого дослідження необхідно обрати теплову математичну модель для визначення робочої температури сонячного модуля [8], в якій використовуються інтерактивні методи. На рис. 2.11 представлено спрощену теплову модель фотоелектричного модуля.

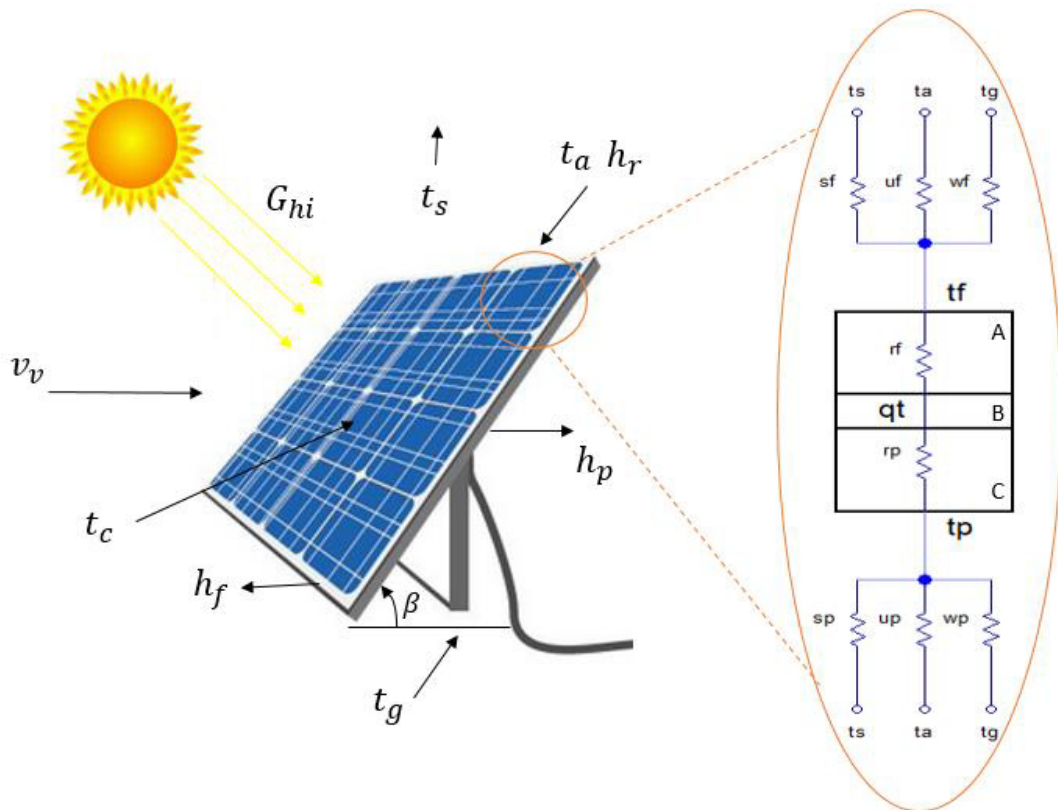


Рисунок 2.11 – Теплова модель фотоелектричного модуля

Відповідна їй математична модель має вигляд:

$$q_t = \alpha * (1 - r) * G_{hi} - \eta * G_{hi}, \quad (2.11)$$

де: q_t - теплова генерація на одиницю площі (W/m^2); r - частка потужності, відображена у сонячному елементі ($m^2 \text{ } ^\circ C/W$); α - частка потужності, що споживається сонячним елементом; Ghi - пряме глобальне випромінювання (W/m^2); η - ефективність сонячної панелі (%).

Коефіцієнт конвективної передачі передньої частини сонячної панелі h_{cf} , ($W/m \text{ } ^\circ C$):

$$h_{cf} = [(2,8 - 3 * v_v)^3 + 4,74 * (t_c - t_a)]^{1/3}. \quad (2.12)$$

Коефіцієнт передачі конвекції задньої частини сонячної панелі h_{cp} , ($W/m \text{ } ^\circ C$):

$$h_{cp} = [(2,1 - 2.3 * v_v)^3 + 3,80 * (t_c - t_a) * \sin(\beta)]^{1/3}. \quad (2.13)$$

Коефіцієнт пропускання випромінювання передньої панелі сонячної батареї h_{rf} , ($W/m \text{ } ^\circ C$):

$$h_{rf} = \epsilon_f * [6,67 * 10^{-8} * t_a^3 * (1 + (t_c/t_a) * (1 + (t_c/t_a))^2)], \quad (2.14)$$

де: t_a - температура навколишнього середовища ($^\circ C$); t_c - температура фотоелемента ($^\circ C$);

Коефіцієнт пропускання випромінювання задньої частини сонячної панелі h_{rp} , ($W/m \text{ } ^\circ C$):

$$h_{rp} = h_{rf} * (\epsilon_f/\epsilon_p); \quad (2.15)$$

$$r_f = \sum(x/k)_i, \quad r_p = \sum(x/k)_i; \quad (2.16)$$

$$h_f = h_{cf} + h_{rf}, \quad h_p = h_{cp} + h_{rp}, \quad (2.17)$$

де: k -провідність кожного інкапсулюючого шару ($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$); v_v – швидкість вітру (m/s); β – кут нахилу фотоелектричного генератора ($^\circ\text{C}$); ϵ_f - коефіцієнт випромінювання поверхні лицьової панелі; ϵ_p – коефіцієнт випромінювання поверхні лицьової панелі; x - товщина кожного шару (m);

$$a_f = 1 + h_f * r_f, \quad a_p = 1 + h_p * r_p, \quad (2.18)$$

де: h_f – загальний коефіцієнт провідності та фронтальне теплове випромінювання ($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$); h_p – коефіцієнт глобальної провідності та подальше теплове випромінювання ($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$); r_f –опір теплопровідності фронтальних ізоляційних матеріалів ($\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$); r_p –опір теплопровідності наступних герметизуючих матеріалів ($\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$).

Температура точки роси t_{pr} , ($^\circ\text{C}$): Точка роси - це температура повітря, при якій пар, що міститься в ньому, досягає стану насичення і починає конденсуватися в росу.

$$t_{pr} = \frac{243.12 * \ln \left[\left(\frac{e^{\left(\frac{\ln(611.2) + \frac{17.62 * t_a}{243.12 + t_a} \right) * 100}}}{h_r} \right) - 1559.72 \right]}{24.035 - \ln \left(\frac{e^{\left(\frac{\ln(611.2) + \frac{17.62 * t_a}{243.12 + t_a} \right) * 100}}}{h_r} \right)}, \quad (2.19)$$

де: h_r – відносна вологість (%); t_a – температура навколишнього середовища ($^\circ\text{C}$).

Еквівалентна абсолютна температура повітря, t_s , ($^\circ\text{C}$):

$$t_s = t_a * [0,8 + t_{pr}/250]^{0.25}, \quad (2.20)$$

де: t_a – температура навколишнього середовища ($^\circ\text{C}$).

Коефіцієнти теплового випромінювання, $[W/m^2 \text{ } ^\circ C]$: Випромінювальна здатність об'єкта це відношення потужності випромінювання об'єкта за даної температури до потужності випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ). АЧТ визначається як поверхня, що випромінює максимальну кількість енергії при цій температурі. Випромінювальна здатність АЧТ дорівнює 1,00.

$$s_f = s_p = [0,711 + 0,56 * t_{pr}/100 + 0,73 * (t_{pr}/100)^2] + 0,013 * \cos(2\pi * h/24) + 1,2 * 10^{-4} * (p_a - 1000), \quad (2.21)$$

де: s_f - коефіцієнти теплового випромінювання в небо від передньої частини сонячного модуля ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$); s_p - коефіцієнти теплового випромінювання в небо від задньої частини сонячного модуля ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$); p_a - атмосферний тиск [Bar]; h -години дня [година]; t_{pr} - температура точки роси ($^\circ C$).

Коефіцієнти теплового випромінювання на землю ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$):

$$w_f = \left(\frac{6.67 * 10^{-8} * \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) * \epsilon_f}{\frac{1 - \cos(\beta)}{2} * (1 - \epsilon_f) + \epsilon_f} \right) * (t_f^4 - t_g^4) * (t_f - t_g); \quad (2.22)$$

$$w_p = \left(\frac{6.67 * 10^{-8} * \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) * \epsilon_p}{\frac{1 - \cos(\beta)}{2} * (1 - \epsilon_f) + \epsilon_p} \right) * (t_p^4 - T_g^4) * (t_p - t_g), \quad (2.23)$$

де: w_f - коефіцієнти теплового випромінювання на землю від передньої частини сонячного модуля ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$); w_p - коефіцієнти теплового випромінювання на землю від задньої частини сонячного модуля ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$); h -години дня (година); t_g - еквівалентні абсолютні температури ґрунту ($^\circ C$).

Наступні рівняння вирішуються інтерактивними математичними методами:

$$t_c = \left[\frac{q_t + \left(\frac{w_f}{a_f} + \frac{w_p}{a_p} \right) * (t_g - t_a) + \left(\frac{s_f}{a_f} + \frac{s_p}{a_p} \right) * (t_s - t_a)}{\left(\frac{h_f}{a_f} + \frac{h_p}{a_p} \right)} \right] - t_a ; \quad (2.24)$$

$$t_f = \left[\frac{(t_c - t_a) + r_f * w_f * (t_g - t_a) + r_f * s_f * (t_s - t_a)}{a_f} \right] - t_a ; \quad (2.25)$$

$$t_p = \left[\frac{(t_c - t_a) + r_p * w_p * (t_g - t_a) + r_p * s_p * (t_s - t_a)}{a_p} \right] - t_a, \quad (2.26)$$

де: t_f – абсолютні температури лицьової поверхні панелі (°C); t_a – температура навколишнього середовища (°C); t_c – температура фотоелемента (°C); t_g – еквівалентні абсолютні температури ґрунту (°C); t_p – абсолютні температури тильної поверхні панелі (°C).

Цей метод названий номінальною робочою температурою комірки ($T_{НОСТ}$). Температура комірки (T_c) розраховується за такою формулою:

$$T_c = T_a + G_i / G_{НОСТ} * (T_{НОСТ} - T_{a,НОСТ}), \quad (2.27)$$

де: G_i – падаюче випромінювання в площині панелі; $T_{НОСТ}$ вимірюється при падаючому випромінюванні $G_{НОСТ} = 800 \text{ Вт/м}^2$, температурі навколишнього середовища T_a , $НОСТ 20^\circ\text{C}$ та швидкості вітру 1 м/с. $T_{НОСТ}$ – це дані, надані виробником фотоелектричної панелі, що залежить від технології, за якою він був побудований, зазвичай близько 45°C

За моделлю Курца [6] ми можемо розрахувати температуру комірки, використовуючи рівняння:

$$T_c = T_a + I * e^{-3.473 - 0.0594 * V}. \quad (2.28)$$

2.2.3 Математична модель трифазного інвертора

Трифазний інвертор є схемою з трьома паралельними гілками, в кожній гілці міститься по два транзистори (рис. 2.12). Важливим компонентом ФЕС є перетворювач, який має у своєму складі перетворювач напруги, що підвищує (DC/DC-перетворювач) від 200 до 700 В, трифазний інвертор, виконаний на основі IGBT-модулів за трифазною мостовою схемою, пропорційно-інтегральні регулятори струму і напруги (ПІ). Час відкриття та закриття IGBT-модулів становить кілька мілісекунд, що дозволяє ефективно використовувати принцип широтно-імпульсної модуляції для отримання синусоїдальної напруги на виході інвертора.

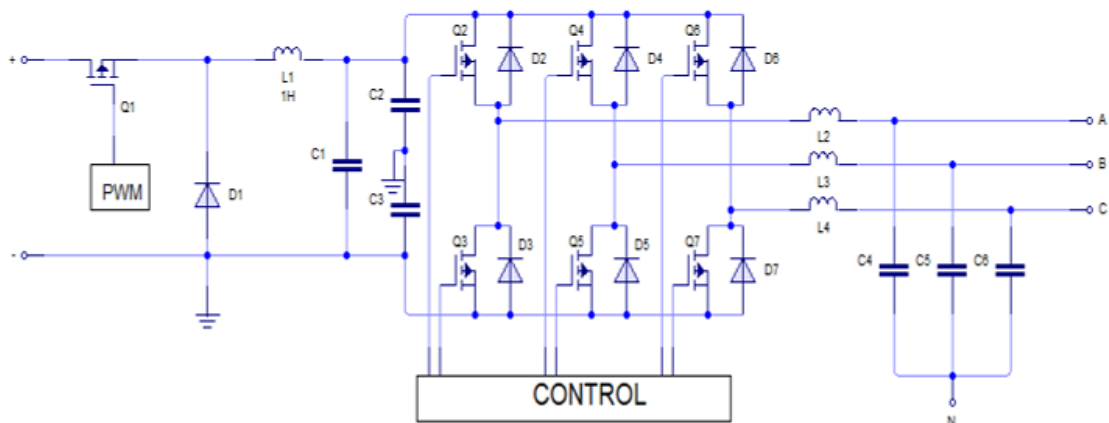


Рисунок 2.12 – Електрична схема трифазного інвертора

Генератор PWM відповідає за відтворення сигналу перемикання на напівпровідникові пристрої живлення. Для цієї системи використовується синусоїдальна модуляція за шириною уніполярного імпульсу. Основна частота модульованої хвилі повинна мати значення, що дорівнює значенню бажаного виходу, в цьому випадку бажана частота дорівнює 50 Гц. Ступінь живлення складається з напівпровідникових перемикаючих пристроїв, у цьому випадку змодельована повна система мостового перетворення типу постійного струму на

змінний, як показано на рис. 2.12. Рівняння, що описують математичну поведінку перетворювача потужності BOOST, представлені нижче:

$$\frac{L di}{dt} = V_i - (1 - D) * V_c ; \quad (2.29)$$

$$\frac{C dv}{dt} = (1 - D) * I_L - \frac{V_c}{R} ; \quad (2.30)$$

$$V_o = \frac{V_i}{1-D} . \quad (2.31)$$

Як показано на рис. 2.12 вхідний конденсатор працює як джерело напруги, а індуктивності - як джерела струму. Ця схема вирішується шляхом застосування законів Кірхгофа з урахуванням падіння напруги в кожному компоненті або струму, що протікає через нього, з якого отримуємо наступні рівняння. Для альтернативної частини:

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} * \begin{bmatrix} I_a - I_b \\ I_b - I_c \\ I_c - I_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a - V_b \\ V_b - V_c \\ V_c - V_a \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} * \begin{bmatrix} I_{ab} \\ I_{bc} \\ I_{ca} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad \text{где:}$$

$$\frac{d}{dt} * \begin{bmatrix} I_{ab} \\ I_{bc} \\ I_{ca} \end{bmatrix} = \frac{1}{3L} * \begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} - \frac{1}{3L} * \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} . \quad (2.32)$$

Для частини постійного струму:

$$i_{dc} = C \frac{dv_{dc}}{dt} + \frac{v_{dc}}{R} ; \text{ то } \frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} i_{dc} - \frac{v_{dc}}{RC} . \quad (2.33)$$

2.2.4 Математична модель трифазного трансформатора

На рис. 2.13 представлений трифазний трансформатор. Напруги в первинній та вторинній обмотках трифазного трансформатора:

$$u_{pk} = R_p * i_{pk} + L_{dp} * di_{pk}/dt + e_{pk} ; \quad (2.34)$$

$$u_{sk} = R_s * i_{sk} + L_{ds} * di_{sk}/dt + e_{sk}, \quad (2.35)$$

де: u_{pk} - напруга первинної обмотки, u_{sk} - напруга вторинної обмотки, R_p - опір первинної обмотки, R_s - опір вторинної обмотки, i_{sk} - струм вторинної обмотки, e_{pk} - індукована напруга в первинній обмотці, e_{sk} - індукована напруга у вторинній обмотці, L_{dp} - коефіцієнт первинної самоіндукції;

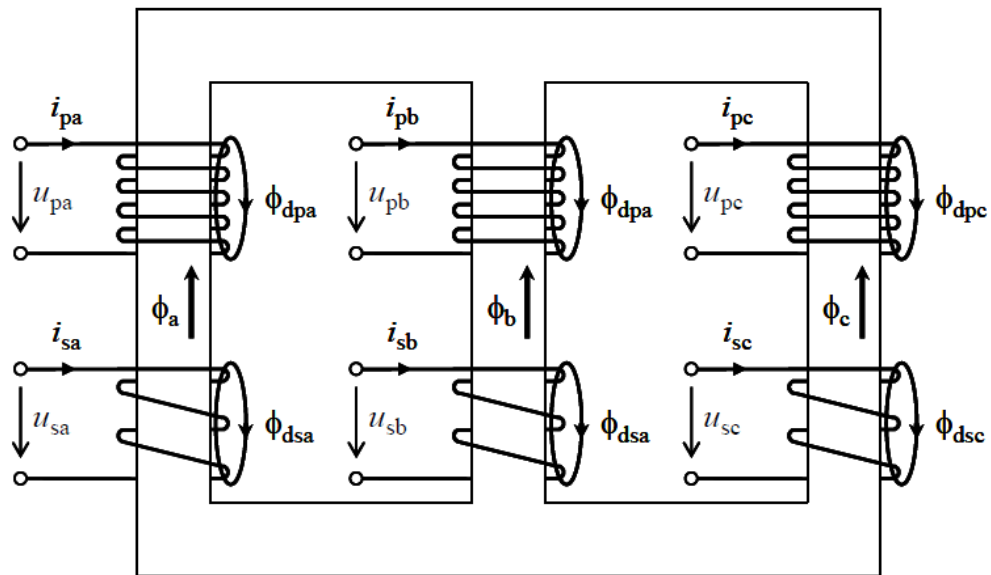


Рисунок 2.13 – Трифазний трансформатор із трьома стрижнями

2.2.5 Математична модель профілю освітлення фотоелемента

Сонячна радіація, що припадає на приймальний ФЕМ, характеризується профілем освітленості як функцією часу протягом світлого часу дня від сходу до заходу Сонця, який залежить від кута між напрямком на Сонці і площиною розташування ФЕМ (рис. 2.14). З цього випливає, що необхідно розрахувати цю функцію визначення ефективного використання прямого перетворення сонячної енергії.

Тому кількість сонячної енергії, яку може перетворити ФЕС, залежить від широти місця, на якому вона розташовується, від кута її нахилу щодо спрямування на південь, від пори року та зміни положення Сонця.

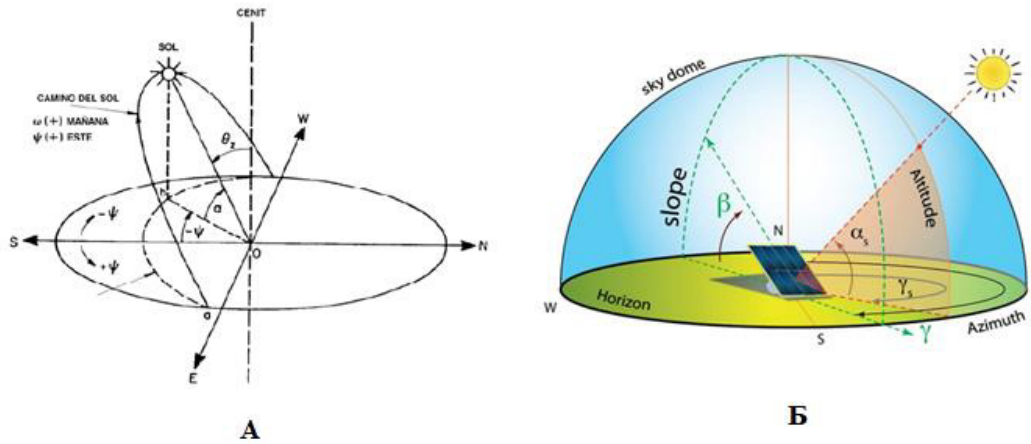


Рисунок 2.14 – Рух Сонця поверхнею Землі

Часовий кут Сонця розраховується за формулою:

$$w = (\pi/12) * [t_{utc} - 12 * (L_{loc} - L_{utc}/15) + E/60]; \quad (2.36)$$

$$t_{utc} = h - (L_{loc} - L_{utc}/15), \quad (2.37)$$

де: L_{loc} – географічна довгота місця (°F); h – час доби (година); w – кут сонячного часу (°F); t_{utc} – стандартний час (година); L_{utc} – довжина опорного меридіана (°F).

Рівняння корекції часу:

$$E = 229.18 * (7.5 * 10^{-6} + 1.868 * 10^{-3} * \cos(e) - 32.077 * 10^{-3} * \sin(e) - 11.4615 * 10^{-3} * \cos(2 * e) - 40.89 * 10^{-3} * \sin(2 * e)); \quad (2.38)$$

$$e = 2 * \pi * (nd - 1/365). \quad (2.39)$$

Наступні два рівняння (2.40) та (2.41) представлені для розрахунку зміни положення Сонця:

$$\delta = 6.915 * 10^{-3} - 0.39912 * \cos(e) + 70.257 * 10^{-3} * \sin(e) - 6.758 * 10^{-3} * \cos(2 * e) + 0.907 * 10^{-3} * \sin(2 * e) - 2.692 * \cos(3 * e) + 1.48 * 10^{-3} * \sin(3 * e); \quad (2.40)$$

$$\theta_z = \cos^{-1}(\sin(\delta) * \sin(\varphi) + \cos(\delta) * \cos(\varphi) * \cos(w)); \quad (2.41)$$

$$\theta = \cos^{-1}(\beta) * \cos(\theta_z) + \sin(\beta) * \sin(\theta_z) * \cos(\gamma_s - \gamma); \quad (2.42)$$

$$\gamma_s = \text{seg}(w) | \cos^{-1}(\theta_z) * \sin(\varphi) - \sin(\delta) \sin(\theta_z) * \cos(\varphi) |; \quad (2.43)$$

$$\alpha = \sin^{-1}(\cos(\theta_z)), \quad (2.44)$$

де: δ – Кут сонячного відмінювання ($^{\circ}\text{F}$); θ_z – Кут сенітал ($^{\circ}\text{F}$); φ – Географічна широта місця ($^{\circ}\text{F}$); h – Час доби (година); β – Кут нахилу сонячної панелі щодо горизонталі ($^{\circ}\text{F}$); γ_s – Сонячний азимут ($^{\circ}\text{F}$); w – Кут сонячного часу ($^{\circ}\text{F}$); α – Сонячний кут висоти ($^{\circ}\text{F}$); n_d – день року ($1 \leq n_d \leq 365$).

$$rb = \cos(\beta) + \sin(\beta) * \tan(\theta_z) * \cos(\gamma_s - \gamma). \quad (2.45)$$

Нижче наведено рівняння для розрахунку падаючого горизонтального випромінювання на похилій площині:

$$G_{oh} = [1.37 * (1 + 0.033 * \cos(2 * \pi * n_d / 365)) * \sin(\delta) * \sin(\varphi) + \cos(\delta) * \cos(\varphi) * \cos(w)] * 1000; \quad (2.46)$$

$$k_t = G_h / G_{oh}; \quad (2.47)$$

$$\begin{aligned}
 (0.22 < k_t < 0.8) &\rightarrow f = 0.9511 - 0.1604 * k_t + 4388 * k_{t2} - 16.638 * k_{t3} + \\
 &+ 12.336 * k_{t4}; (k_t > 0.8) \rightarrow f = 0.165; \\
 (k_t \leq 0.2) &\rightarrow f = 1 - 0.09;
 \end{aligned}
 \tag{2.48}$$

$$G_{dh} = (f * I_h); \tag{2.49}$$

$$G_{bh} = I_h - (f * I_h); \tag{2.50}$$

$$\tau_b = (1 - f) * k_t; \tag{2.51}$$

$$G_i = r_b * (I_{bh} + \tau_b * I_{dh}) + (1 - \tau_b) * G_{dh} * (1 + \cos(\beta)/2) + \rho_g * G_h * (1 - \cos(\beta)/2), \tag{2.52}$$

де: G_h – горизонтальне сонячне випромінювання (Вт/м²); ρ – коефіцієнт відбиття ґрунту (див. таблицю А.9); G_{dh} – горизонтальне погодинне пряме випромінювання (Вт/м²); G_{bh} – горизонтальне дифузне погодинне випромінювання (Вт/м²); k_t – погодинний індекс ясності; G_i – горизонтальне випромінювання в похилій площині.

В якості навантаження, для Новосанжарського району Полтавської області прийнято підприємства, що належать до адміністративних, житлових та господарських об'єктів. Сонячна підстанція не має достатньої потужності для забезпечення електроживлення у всіх режимах роботи навантаження. Звідси прямий зв'язок мети роботи зі збільшення генерації електроенергії задля забезпечення безперебійної її подачі споживачам.

2.3 Висновки за розділом

1. Проаналізовано існуючі підходи до формування структури електротехнічного комплексу, що містить сонячну електростанцію.

2. На основі аналізу існуючих математичних моделей та компонентів електротехнічного комплексу, що містить сонячну електростанцію, було обрано найбільш коректні, що дозволяють адекватно оцінити функціональні та технічні можливості цих компонентів.

3. Встановлено, що підвищення температури сонячної батареї може призвести не тільки до зменшення потужності, що генерується, але і до неможливості функціонування сонячної електростанції як цілісної системи. Це пов'язано з тим, що при проектуванні сонячної електростанції підбір обладнання часто здійснюється виходячи лише з загальних технічних характеристик, зазначених у технічній документації, не враховуючи температурних характеристик.

4. Проаналізовано кліматичні умови, врахування яких необхідно для оптимального функціонування електротехнічного комплексу

До них відносяться: сонячне випромінювання (G_h); температуру довкілля (T_a); атмосферний тиск (P_a); відносну вологість (H_r) та швидкість вітру (V_v).

3 АНАЛІЗ ГЕНЕРАЦІЇ І СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

3.1 Моделювання зміни погодних умов, що впливають на вироблення електроенергії фотоелектричними модулями в умовах Новосанжарського району

У процесі виконання бакалаврської роботи було розроблено модель у програмному середовищі Matlab (рис. 3.1). Розроблена модель дозволяє вивчати основні електричні змінні, що формують систему підключення до мережі, з урахуванням конкретних погодних умов у регіоні. Основною змінною, що вивчається за допомогою моделі Matlab/Simulink, є енергія, що генерується фотоелектричною системою без моніторингу, а також із системою стеження за Сонцем. Отримані в результаті імітаційного моделювання залежності необхідні для оцінювання ефективності систем стеження за Сонцем у конкретних кліматичних умовах Новосанжарського району. Для моделювання в реальних кліматичних умовах в програму вводять дані, що описують кліматичні характеристики.

Було проведено два типи моделювання, що описують два випадки. У першому випадку враховувалися лише два кліматичні фактори – сонячна радіація та температура навколишнього середовища. У другому випадку враховувалися п'ять факторів – сонячне випромінювання, температура навколишнього середовища, відносна вологість, швидкість вітру та атмосферний тиск. Моделювання з різними змінними необхідно для того, щоб виявити різницю між результатами обох симуляцій і зробити остаточні висновки.

Модель складається з чотирьох основних блоків: Перший блок моделі, який називається метеорологічною станцією, відповідає за завантаження кліматичних даних.

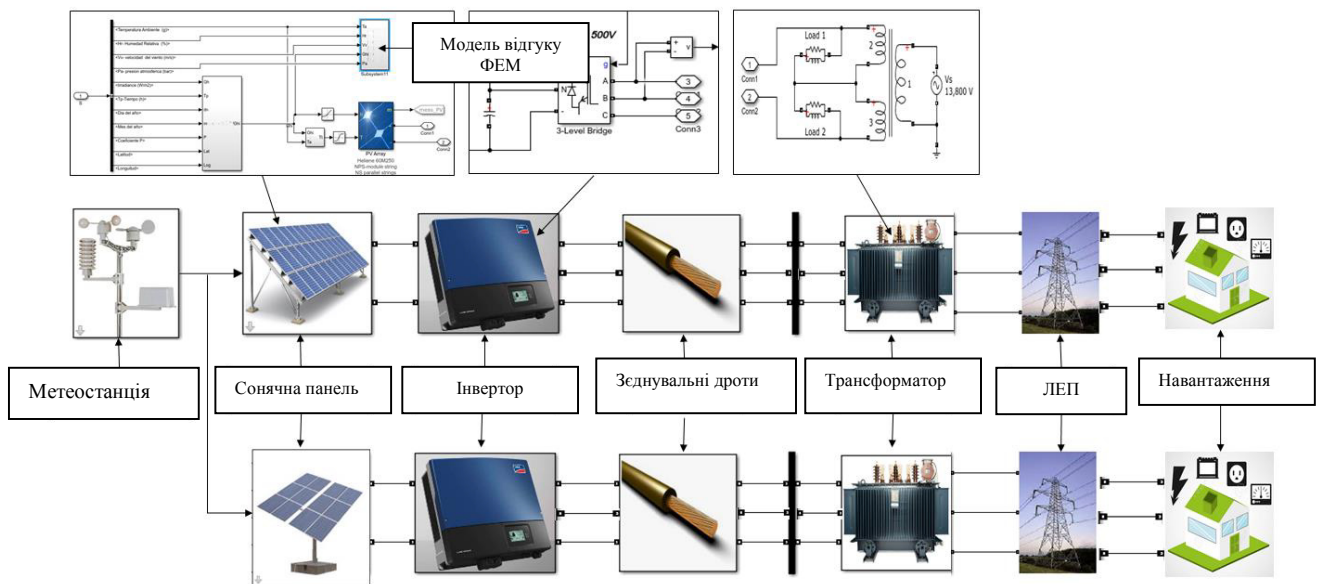


Рисунок 3.1 – Модель Matlab / Simulink електротехнічного комплексу з фотоелектричними панелями потужністю 2.5 МВт

У програму вводяться такі параметри: падаюче випромінювання, температура навколишнього середовища, відносна вологість, атмосферний тиск і швидкість вітру, вводяться в програму, розроблену в Matlab/Simulink. Другий блок програми, розробленої в Matlab/Simulink, відповідає математичним моделям сонячного модуля.

На рис. 3.2 показані блоки, що становлять статичну систему, реалізовану у програмі Matlab/Simulink:

Перший блок містить рівняння, що описують математичну модель сонячного модуля (2.1); Інший блок містить рівняння поверхні відкриття; Третій блок містить рівняння, які описують траєкторію сонячного шляху в небі у часовому діапазоні з 6:00 до 18:00 у звичайний день (2.52). Четвертий блок містить рівняння теплової моделі фотоелектричного елемента для визначення робочої температури фотоелектричного модуля з урахуванням кліматичних параметрів регіону (рівняння (2.24), (2.27) та (2.28).

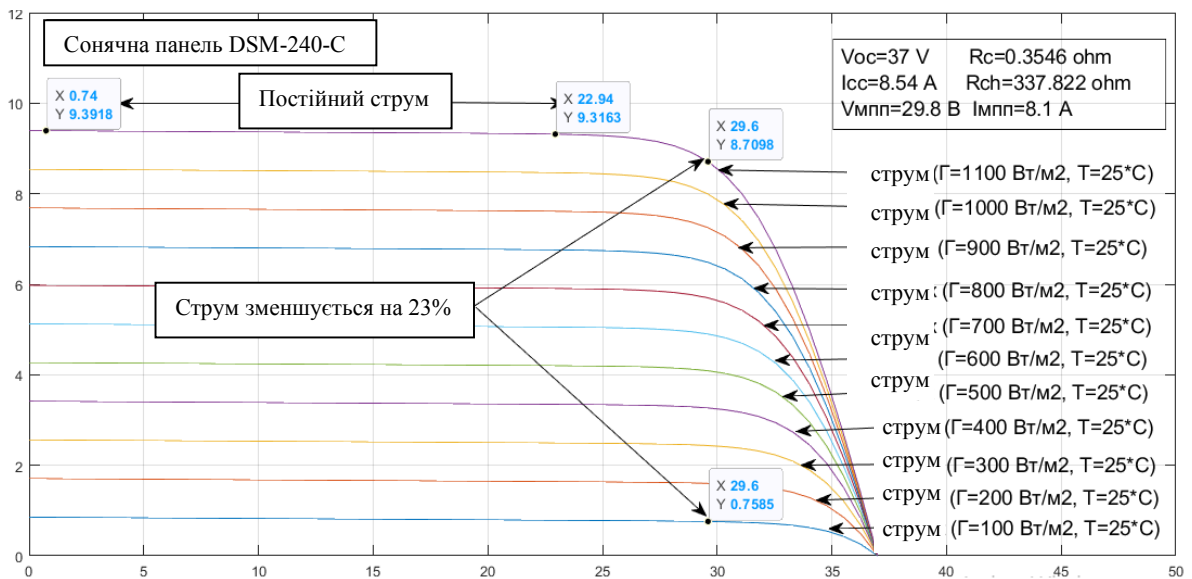


Рисунок 3.3 – Вольтамперна характеристика фотоелемента, що працює з різним сонячним випромінюванням

На рис. 3.3 представлені залежності струму короткого замикання, напруги холостого ходу та максимальної потужності фотоелемента від сонячного випромінювання. Струм короткого замикання та максимальна потужність мають лінійні залежності від величини сонячного випромінювання. Максимальні значення потужності, напруги та струму досягаються при значенні сонячного потоку 1100 Вт/м². При падінні інсоляції на 100 Вт/м² значення струму короткого замикання та потужності падають у середньому на 94 %. У той час як напруга холостого ходу залежить від освітленості меншою мірою і практично не змінюється.

На рис. 3.4 показані робочі температури сонячного модуля при 50°C (перевищення стандартної робочої на 25°C), максимальна потужність панелі зменшиться приблизно на 18% і отже, енергія, що генерується, також зменшиться в такій же пропорції. Ця залежність пояснюється тим, що зі збільшенням температури ефективність сонячних батарей знижується.

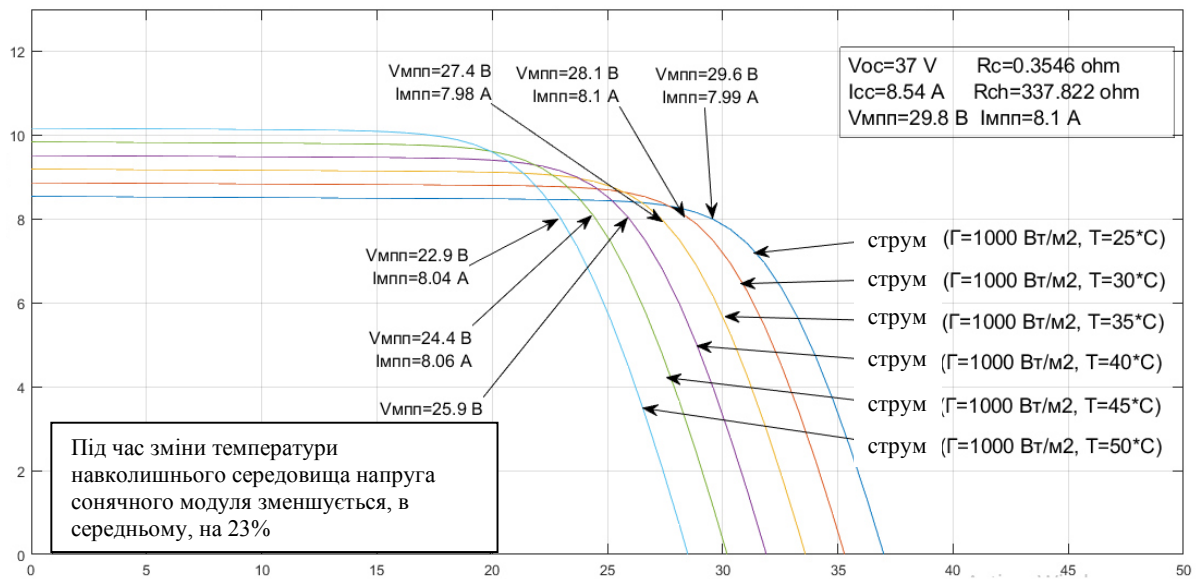


Рисунок 3.4 – Вольтамперна характеристика фотоелемента, що працює за різних робочих температур

Для робочих температур вище 60 градусів можна констатувати, що потужність сонячного модуля, згідно з математичним моделюванням у програмі Matlab (рис. 3.4), зменшується на 23%. Це вказує на те, що енергія, що генерується кожною із сонячних панелей сонячної електростанції також знизиться на 23%. Це є неприпустимим, оскільки подібне зниження продуктивності панелі може призвести до різкого перепаду напруги у споживачів. Тому необхідний пошук технічних засобів та рішень для мінімізації ймовірності нагріву панелі до таких температур. При цьому зворотна ситуація зустрічається коли температура нижче 25°C вироблення енергії тоді може бути більше ніж номінальна максимальна потужність P_m . Тобто в даному випадку охолодження сонячних модулів позитивно впливає на їхню продуктивність.

Результати робочої температури сонячного генератора відповідають травню 2024 року, коли було виміряні кліматологічні змінні (сонячна радіація, температура навколишнього середовища, атмосферний тиск, швидкість вітру та відносна вологість). Зокрема було вирішено змоделювати цей місяць, оскільки

для Новосанжарського району Полтавської області це місяць із найвищою сонячною радіацією.

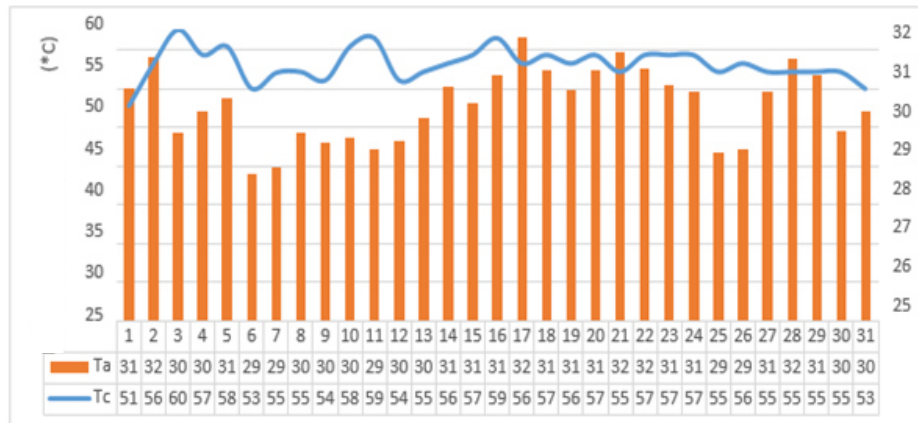


Рисунок 3.5 Результати моделювання в MATLAB робочої температури сонячного генератора

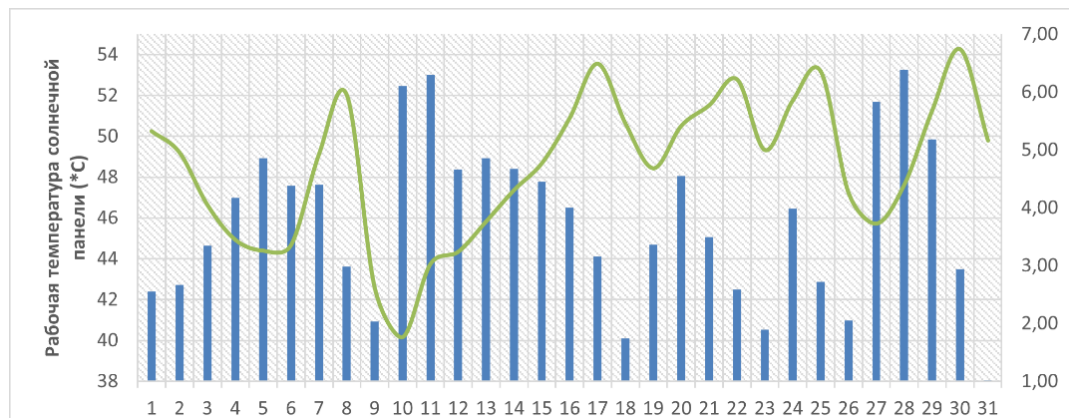


Рисунок 3.6 – Залежність робочої температури сонячної панелі від швидкості вітру

На рис. 3.6 показано залежність робочої температури модуля та швидкості вітру. Було виявлено таку закономірність - якщо швидкість вітру перевищує 3 м/с, робоча температура модуля значно знижується (коли швидкість вітру 3 - 7 м/с, температура знижується на 3 - 5°C).

Це є позитивним моментом, оскільки чим панель працює при стандартній робочій температурі (25°C), тим вища її продуктивність. На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що для високих швидкостей вітру в регіоні сонячний модуль матиме більш ефективні електричні характеристики, тому що його охолодження буде вищим, що спричиняє зниження робочої температури сонячної панелі.

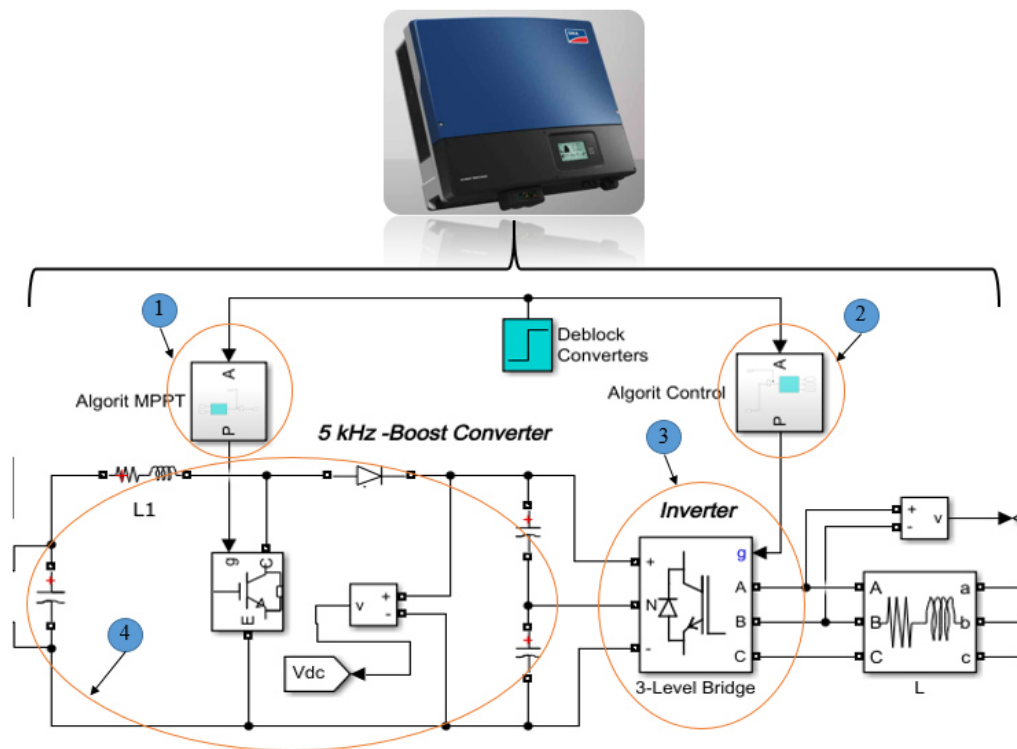


Рисунок 3.7 - Подання математичної моделі трифазного інвертора в Matlab/Simulink

У блоці 1 були реалізовані всі рівняння, що належать до алгоритму управління МППТ для перетворювача потужності Boost; 2. У блоці 2 реалізовані рівняння та алгоритм; У блоці 3 описаний силовий каскад трифазного інвертора. У блоці 4 представлена електрична схема, що становить перетворювач потужності Boost.

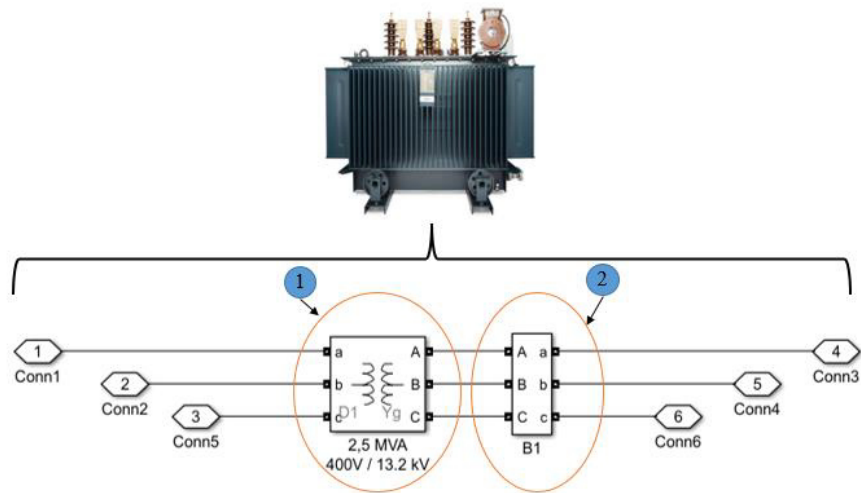


Рисунок 3.8 – Подання трифазного трансформатора у програмі Matlab / Simulink

На рис. 3.8 показана модель трифазного трансформатора відповідно до реальних характеристик трансформатора, що використовується на сонячній електростанції у Новосанжарському районі Полтавської області.

Блок 1 представляє навантаження, з'єднане з фазами трансформатора. Блок 2 є вузол підключення, на якому проводяться всі необхідні електричні вимірювання.

Моделювання, виконане в рамках даного дослідження, дозволить визначити поведінку фотоелектричного модуля за зміни його робочої температури. Дані залежності необхідні для підвищення ефективності електротехнічного комплексу загалом.

Однак відомо, що на робочу температуру впливає не тільки температура навколишнього середовища, але й такі параметри як вологість, швидкість вітру, тиск та інші величини. Тому необхідно визначити залежності виробленої сонячним модулем енергії і даних кліматичних змінних.

3.2 Результати моделювання в пакеті Matlab/Simulink

За результатами моделювання в Matlab/Simulink було визначено, що для конкретних кліматичних умов Новосанжарського району Полтавської області у найактивніший місяць Сонячного випромінювання (максимальна температура навколишнього середовища 32°C), різниця у виробленні електроенергії сонячною електростанцією потужністю 2,5 МВт, в середньому становлять приблизно 6% (сонячні панелі сонячного генератора працюють при температурі вище 25°C). На рис. 3.9 показано результати для травня 2024 року.

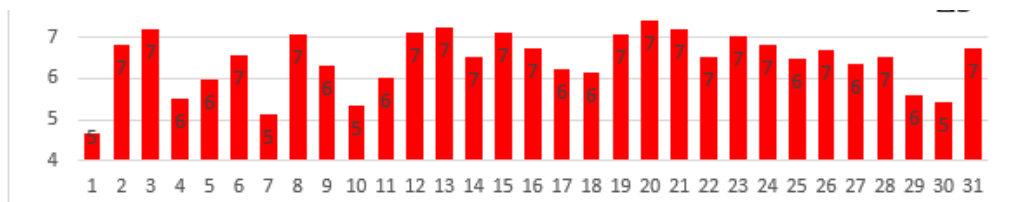


Рисунок 3.9 – Різниця енергії, що виробляється системою в день, внаслідок підвищення робочої температури сонячної панелі вище від номінальних 25°C

На рис. 3.9 було показано, що температура довкілля у регіоні впливає на робочу температуру сонячної панелі – сонячна панель працює вище номінальних 25°C. На підставі отриманих результатів можна стверджувати, що максимальні втрати через температуру становлять 7% протягом усього року. Сонячні панелі сонячного генератора працюють при робочій температурі 57°C і температурі навколишнього середовища 31°C.

3.3 Математичне моделювання двоосьової системи стеження за Сонцем

Ефективність системи сонячного моніторингу для конкретних кліматичних умов Новосанжарського району Полтавської області представлені на рис. 3.10. Показано відсоток приросту енергії за день, що досягається за допомогою систем стеження за сонцем у порівнянні із системами сонячної енергії.

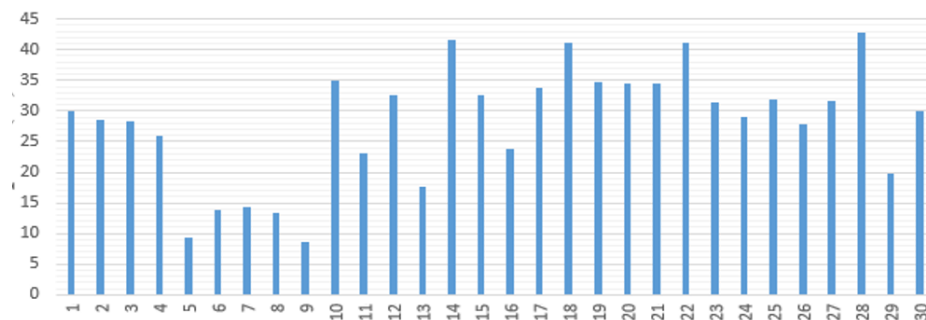


Рисунок 3.10 – Приріст електроенергії за квітень 2024 року

На рис. 3.11 показані результати моделювання, виконаного в середовищі Matlab. Енергія, вироблена електростанцією потужністю 2,5 МВт протягом звичайного дня (8 березня 2024 р.), із системою стеження за Сонцем та стаціонарним сонячним генератором.

Як видно на рис. 3.11, для тих самих змодельованих кліматичних умов у регіоні, енергія, одержувана за допомогою сонячної системи стеження, на 30 % вища порівняно зі стаціонарною системою. Це підтверджує той факт, що сонячні системи стеження є ефективною альтернативою покращення параметрів ефективності цих систем, а також збільшення виробництва енергії.

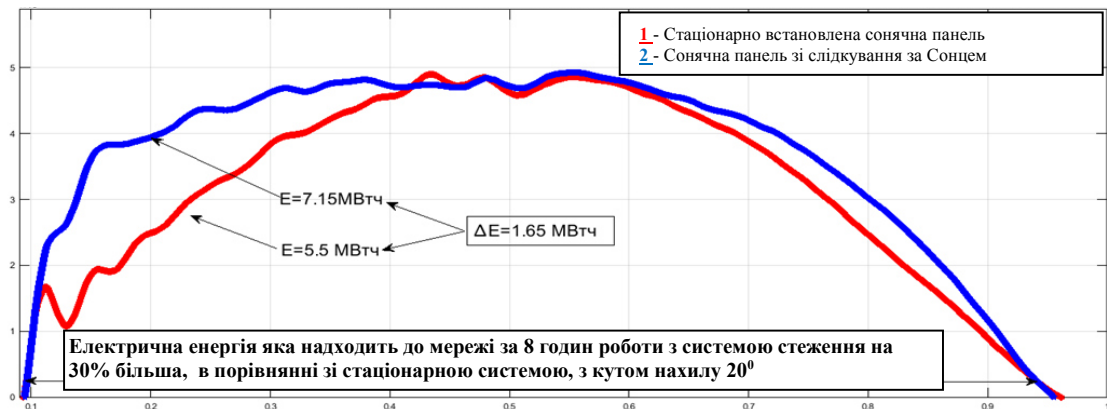


Рисунок 3.10 – Порівняння енергій, отриманої системою стеження за Сонцем та стаціонарною сонячною системою

Після визначення моделі та кількості необхідних сонячних модулів визначається необхідна відстань для кожної групи металевих опор, на якій встановлюватимуться сонячні панелі. На рис. 3.12 показано схему встановлення сонячних панелей.

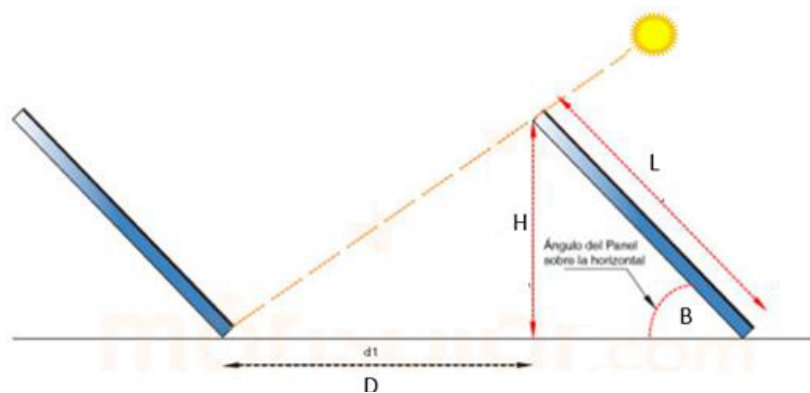


Рисунок 3.12 – Положення опор сонячного генератора

Мінімальна відстань, на якій повинні розташовуватися генератори, становить 2,8 метра ($D_2=2.8$ м), в даний час генератори знаходяться на відстані приблизно 2 метри ($D_1=2$ м). Таке розташування викликає часткове затінення поверхні сонячних модулів у грудні, оскільки сонячна висота є мінімальною в

цей період року. І як наслідок, затінення сонячного модуля призводить до зниження енергії, що виробляється.

Для розрахунку мінімальної відстані між трекерами використовується критерій зимового сонцестояння, що є найгіршим випадком, оскільки спостерігається максимальне затінення поверхонь модулів. Для цього прийнято розташування модулів, вказане рис. 3.13.

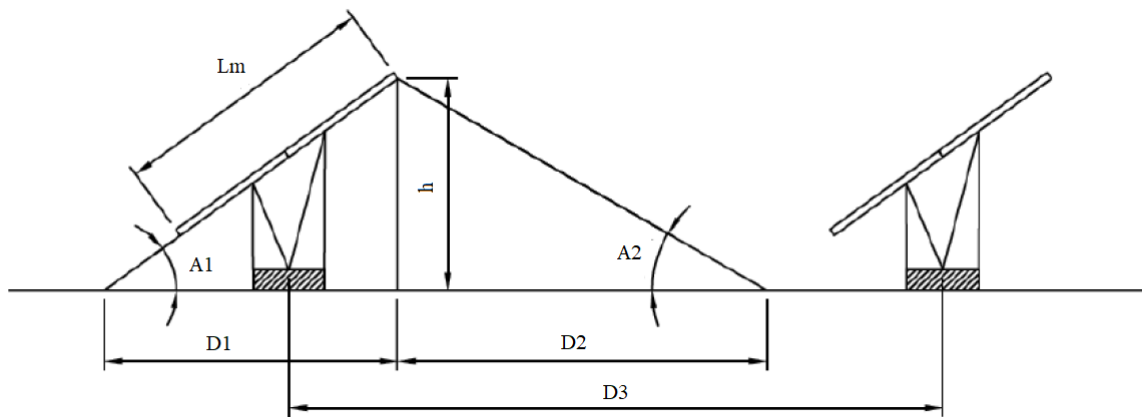


Рисунок 3.13 – Розташування опор сонячного генератора із сонячним трекінгом

де: Lm – Довжина комплексу фотоелектричних модулів (м); $A1$ – Нахил фотоелектричного модуля щодо горизонтальної площини монтаж; $A2$ – Мінімальна висота Сонця опівдні на день зимового сонцестояння (21 грудня); h – висота або вертикальна відстань між горизонтальною монтажною площиною.

Згідно з розрахунками, було виявлено, що потрібно 68 платформ для моніторингу сонячної енергії, щоб забезпечити номінальні характеристики потужності нинішньої сонячної електростанції. Кожна система моніторингу матиме пікову потужність 36 кВт, що відповідає двом інверторам по 17 кВА. З'єднання між сонячними панелями з урахуванням вхідних електричних характеристик інвертора (буде здійснюватися за допомогою 18 панелей,

послідовно з'єднаних, і 3 груп по 18, з'єднаних паралельно для кожного інвертора потужністю 17 кВА.

За допомогою описаного вище типу підключення гарантується, що з'єднання між сонячним генератором і сонячним інвертором не перевищує рівні вхідної напруги та струму сонячного інвертора.

3.4 Висновки за розділом

Існує 4 метеорологічні змінні з більшою кореляцією з електричною енергією сонячної електростанції, сонячною радіацією, температурою навколишнього середовища та відносною вологістю та меншою мірою швидкістю вітру. Існує зворотна кореляція між відносною вологістю та енергією, що означає, що вони обернено пропорційні.

Атмосферний тиск має дуже низьку кореляцію з електричною енергією, що надходить від сонячної системи. Це підтверджує той факт, що атмосферний тиск мало або майже не впливає на енергетичні показники фотоелектричних систем

При оцінці виробленої енергії системи, достатньо враховувати лише дві метеорологічні змінні (температуру навколишнього середовища та сонячну радіацію), оскільки обидві забезпечують понад 86% відгуку системи генерації. Існує прямий зв'язок між сонячним випромінюванням і температурою навколишнього середовища з енергією.

Впровадження більш передових технологій, таких як системи стеження найбільш яскравого об'єкта, оскільки це збільшить кількість електроенергії, що виробляється на 30%. 7. Встановлено, що сонячні системи стеження є альтернативним способом підвищення ефективності уловлювання та подальшого перетворення сонячного випромінювання на фотоелектричних електростанціях.

Висновки

1. Проведений аналіз існуючих підходів до формування структури електротехнічного комплексу, що містить сонячну електростанцію.

2. Виявлено сукупність кліматичних факторів, внесок яких необхідно було оцінити для умов Новосанжарського району Полтавської області: сонячне випромінювання (G_h); температура довкілля (T_a); атмосферний тиск (P_a); відносна вологість (H_r) та швидкість вітру.

3. Для вибраних кліматичних умов достатньо враховувати два фактори: сонячне випромінювання та температуру навколишнього середовища, при цьому коефіцієнт детермінації набуває максимального значення і дорівнює 0,86.

4. Розроблена математична комп'ютерна модель сонячної електростанції дозволяє двома різними способами оцінити величину енергії, що генерується, в конкретних кліматичних умовах. Встановлено, що горизонтальна радіація уловлюється сонячною панеллю та може бути збільшена шляхом впровадження більш передових технологій, таких як системи стеження найбільш яскравого об'єкта, оскільки це збільшить кількість електроенергії, що виробляється, на 30%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про альтернативні джерела енергії: Закон України від 20.02.2003 р. URL: <http://zakon1.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=555-15>
2. Відновлювальні джерела енергії у локальних об'єктах / Ю.І. Якименко, Є.І. Сокол, В.Я. Жуйков, Ю.С. Петергеря, О.Л. Іванін. – К.: ІВЦ „Політехніка”, 2001. – 114 с.
3. Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії: Навчал. посібник / О.І. Соловей, Ю.А. Лега, В.П. Розен, О.О. Ситник, А.В. Чернявський, Г.В. Курбаса. – Черкаси: ЧДТУ, 2007. – 483 с.
4. Інтелектуальні системи керування потоками електроенергії у локальних об'єктах / О.В. Кириленко, Ю.С. Петергеря, Т.О. Терещенко, В.Я. Жуйков. – К.: Медіа ПРЕС, 2005. – 212 с.
5. Atmospheric Science Data Center [електронний ресурс]: NASA Surface meteorology and Solar Energy: Data Subset, URL: <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgiin/sse/subset.cgi?email=em88mi@gmail.com>
6. Boikov, A. V. Savelev, R. V. Payor, V. A. Potapov, A. V. Evaluation of bulk material behavior control method in technological units using DEM. Part 2. CIS Iron and Steel Review, vol. 20, 2020, pp. 10– 13.
7. Enriquez, J.M. et al. A reliable, fast and low cost maximum power point tracker for photovoltaic applications // Solar Energy. 2010. V84 (1). p. 79– 89
8. Influence of solar tracking error on the performance of a small– scale linear Fresnel reflector / Barbón A., Bayón– Cueli C., Bayón L., Ayuso P.F. // Renewable Energy 2020. 162. pp. 43– 54.
9. Peng, Z. Herfatmanesh, M. Liu, Y. (2017). Cooled solar PV panels for output energy efficiency optimisation. Energy Conversion and Management, 150, 949– 955.

ДОДАТКИ

Solar power engineering is one of the areas of alternative energy that studies the direct use of solar radiation to obtain other types of energy. It is the most common type of renewable energy with minimal impact on the environment during the active phase of its use. Therefore, it is necessary to conduct an in-depth critical analysis of electrotechnical complexes with photovoltaic systems, their efficiency and technical elements of which they are composed, as well as specific environmental factors of each geographical region of Ukraine, which affect the efficiency of these systems [1].

The amount of solar radiation depends on geographical coordinates, climatic and geographical features, the state of the atmosphere, the height of the Sun above sea level, etc. The maximum flux of solar radiation only at sea level at the Equator is 1020 W/m^2 . However, it should be taken into account that the average daily value of the flow of solar radiation varies in a wide range [2].

Depending on the method of electricity production in installations that use solar radiation, the area of their application, a different spectrum of radiation can be used. In fig. 1.1 presents the spectral distribution of solar radiation. The paper considers only the visible part of the spectrum of solar radiation, which is involved in the production of electrical energy. Therefore, it should be noted that infrared radiation will also affect the production of electricity, since the radiation of this spectrum affects the operating temperature of the panel.

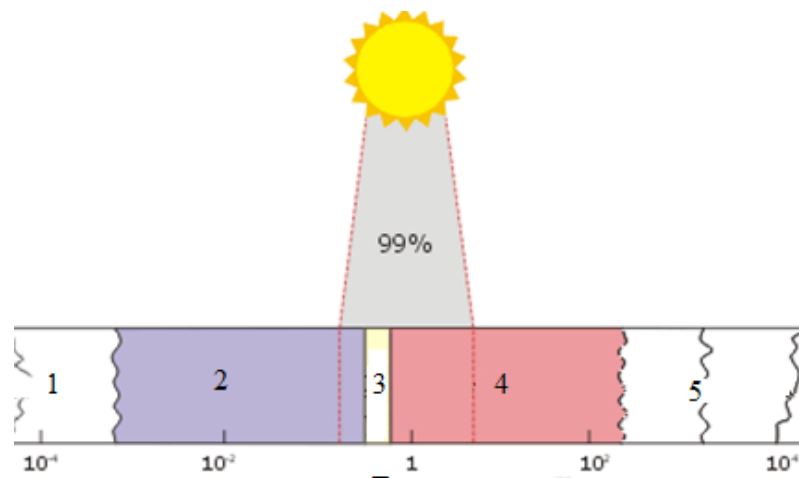


Figure 1.1 – Spectral distribution of solar radiation:

1- X-rays; 2 - Ultraviolet rays; 3 - Spectrum of Visible radiation; 4 – Infrared rays; 5 - microwave rays

Solar radiation has its peak transmission in the visible wavelength range from 0.38 to 0.78 micrometer (μm) electromagnetic. The sun also emits significant amounts of energy in the ultraviolet and infrared regions of the spectrum.

Irradiation ("the arrival of solar radiation") is the total amount of energy and characterizes the power of solar radiation. The unit of radiation destruction is Wh/m^2 daily or another period [3]. The amount of irradiation must be known to calculate the energy produced by the photovoltaic installation. Solar radiation reaching the Earth's surface includes the following components (Fig. 1.2).

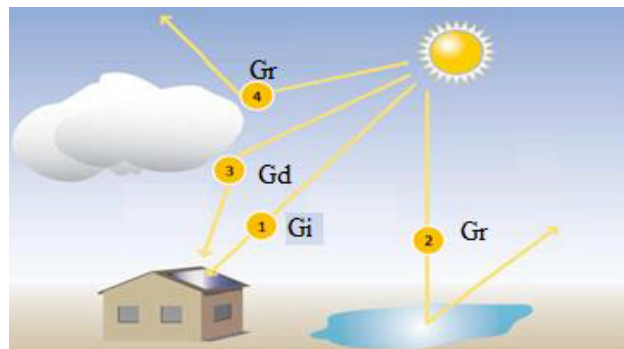


Figure 1.2 – Components of solar radiation on the surface of the Earth, 1. G_i – Direct solar radiation, 2. G_r – Reflected solar radiation 3. G_d – Diffuse solar radiation

1.2 Basic characteristics and structures of photovoltaic cells

One of the most common materials used in the construction of solar cells is silicon, which with special chemical treatment becomes a semiconductor material, which is the most important physical property of solar cells. To study the physical and

chemical composition of semiconductors, an understanding of the photoelectric effect is necessary. Today, there are several types of solar cells, including solar cells. The differences between these modules are in the technology and materials used in their manufacture. At the moment, there are three types of batteries, divided by the material of the base of the element - film, silicon and amorphous.

The structure of a solar photovoltaic module consists of a collection of many individual solar photovoltaic cells (SPEs), so-called cells. Depending on the required output values of current and voltage, all SFEs are connected in series and in parallel.

A solar photovoltaic element is an element that converts the energy of solar radiation into electrical energy based on the internal photoeffect.

The initial parameters are affected by the amount of solar radiation and temperature. The output voltage of the SFE depends on the temperature, while the output current depends on the intensity of solar radiation. When the intensity of the light flux increases by 2 times, the short-circuit current of the SFE increases by 2 times, while the no-load voltage changes slightly.

The temperature coefficient takes into account the temperature difference and is of the order of several milliamps per degree Celsius. A solar cell is the main building block of a photovoltaic system.

An individual cell is usually quite small and produces about 1 or 2 watts of power. To increase the output power of solar cells, they must be connected together to form larger sections - modules. The modules, in turn, can be connected into larger units called arrays, which can be linked together to increase capacity. When cells or modules are connected in series, the output voltage can be increased. On the other hand, to achieve a higher value of the output current, cells or modules must be connected in parallel (Fig. 1.3).

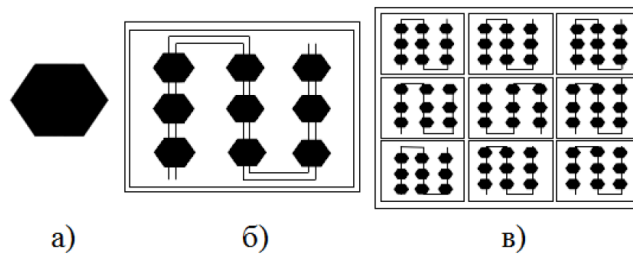


Figure 1.3 - a) Solar cell, b) Solar module, c) Solar battery

The picture of the current-voltage curve of the solar module is shown in Fig.1.4

The mathematical model of a photovoltaic element is built on the basis of a classical equivalent substitution scheme with concentrated parameters, which includes a photocurrent generator, a diode, a shunt resistance (R_{sh}), a series (R_s) resistance [3]. In order to obtain a satisfactory model accuracy, it is necessary to have the specified values of the internal resistances of the photocells.

Today, the development of technologies ensures the appearance of significant variations of photovoltaic batteries.

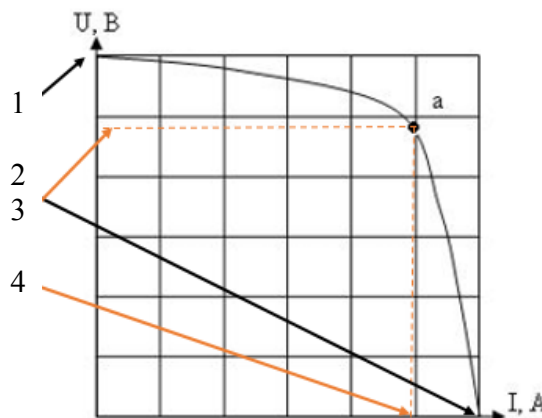


Figure 1.4 - Volt - ampere characteristic of the solar module where: 1 - voltage on the clamps (V); 2 – short-circuit current under normal operating conditions (A), 3- voltage under conditions of maximum power (V); 4 – maximum power current (A).

In fig. 1.5 shows the main types of solar modules [4]. The most common solar modules today are: monocrystalline (efficiency up to 25%), polycrystalline (efficiency up to 20%) and amorphous silicon modules (efficiency no more than 9%). In terms of production cost, monocrystalline modules are the most expensive, followed by polycrystalline modules, and amorphous silicon modules are the cheapest.



Figure 1.5 – Types of solar modules most commonly used today

In fig. 1.6 shows a study conducted by EnergyTrend in 2022 comparing existing types of technologies and their performance.



Figure 1.6 - Graph of efficiency of solar cells and power of panels depending on the technology used

Studying the various parts that make up a photovoltaic module, as well as their electrical characteristics, is an important step in performing mathematical modeling in Matlab. This will allow to know and better understand the dependence of electrical variables on climatic parameters (such as ambient temperature, solar radiation, wind speed, etc.) to which the solar module is exposed.

1.3 Electrical complexes with solar photovoltaic cells

There are several variations of typical solar power plants. The principle of their operation depends on the technology of obtaining electrical energy from solar radiation. The most common are photothermal and photovoltaic installations. Therefore, it is necessary to consider all types of converters, their features and technical parameters, in order to select the most productive installations or installations with the greatest efficiency in the process of converting solar radiation into electricity. Solar energy can be converted into other forms of energy in various ways. Modern technologies include parabolic concentrators, solar parabolic mirrors, and tower-type solar power plants [3]. Solar parabolic concentrators: Solar systems with parabolic concentrators (Fig. 1.7) are the most common type of solar power plants. This technology is the most cost-effective because it is characterized by a low concentration of solar radiation.

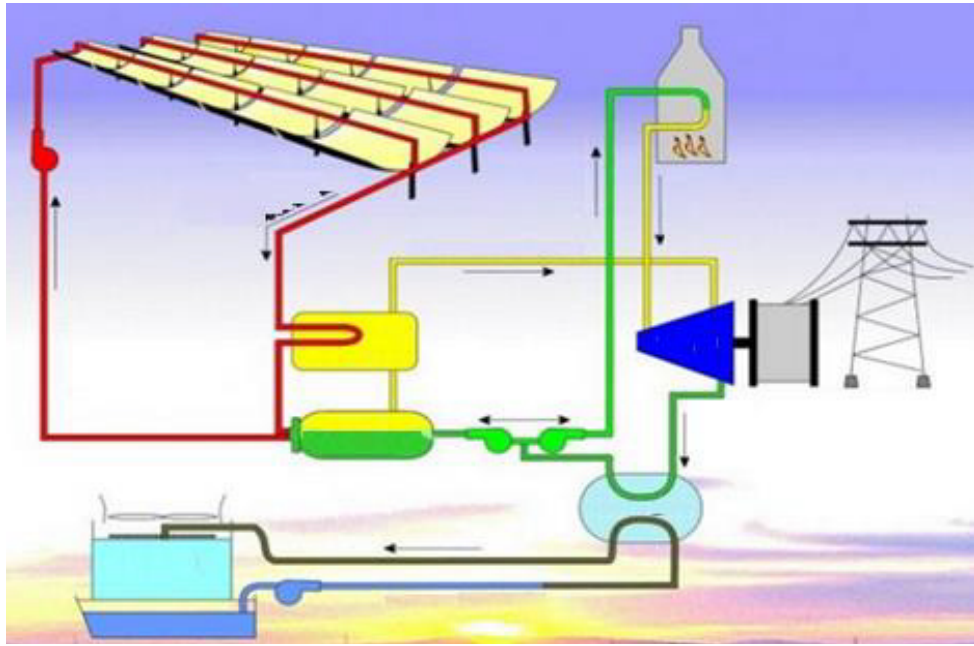


Figure 1.7 – Parabolic concentrators of solar radiation

Solar power plants of the tower type (Fig. 1.8) are used for the production of electrical energy on a large scale. A distinctive feature of this technology is the use of heliostats.

Solar Photoelectric Plants (SPP): The main component of the SPP for the PEM, which is responsible for the direct conversion of solar energy into electrical energy. Depending on the power of the FES and the method of connection to the network, their components may include batteries, converters, controllers and other components. Such installations are designed to obtain electricity from the sun's rays with its subsequent reserve or supply to the grid.

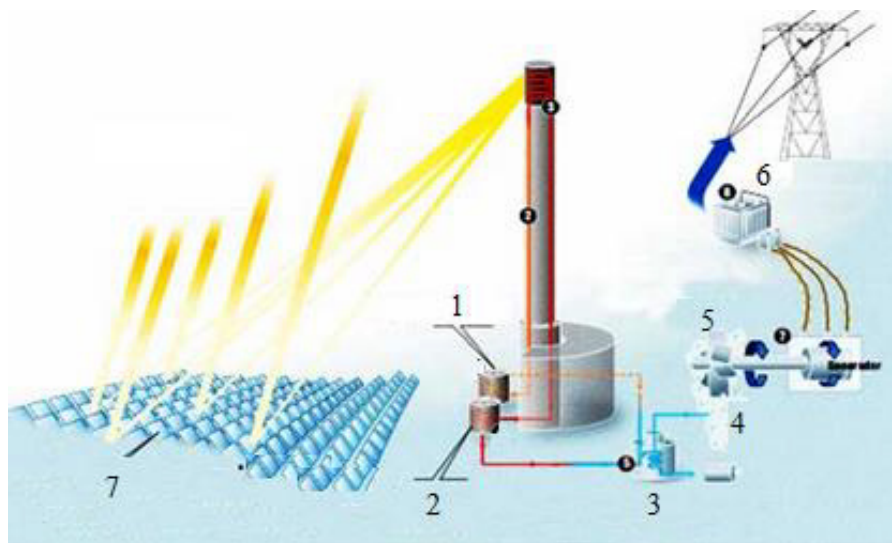


Figure 1.8 – Tower-type solar power plant. 1 - Cold salts, 2 - Hot salts, 3 - Heat exchanger, 4 - Steam, 5 - Turbine, 6 - Transformer

In fig. 1.9 presents the most common structural scheme of the FES - autonomous energy supply of the object. Other variants of the schemes involve the switching of the FES with the network and/or the parallel operation of the FES with another power source.

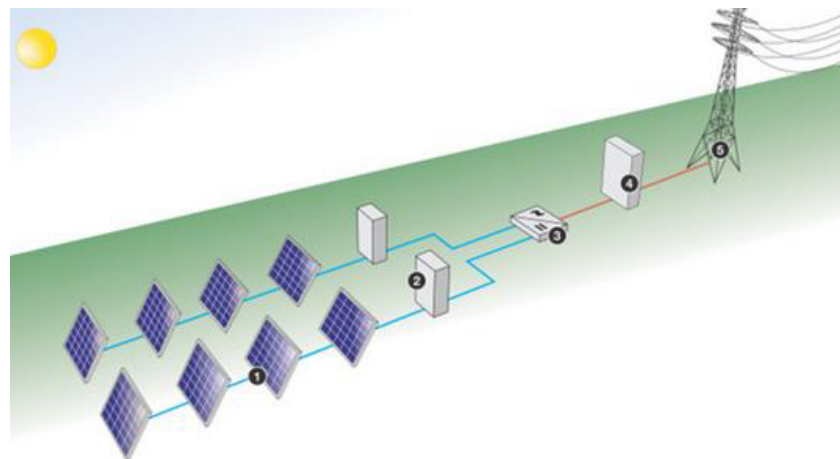


Figure 1.9 – Solar power plant (SPP), 1 – photovoltaic generator, 2, 4 – electrical panels, 3 – inverter, 5 – electrical network of an autonomous object

The advantage of FES is minimal maintenance and rare repairs. Modern solar panels are able to produce electricity even in conditions of short daylight and low solar activity.

1.4 Solar power plants with solar tracking

Flat photovoltaic modules (PEMs) used on the Earth's surface convert direct and scattered solar radiation into the visible part of the spectrum. FEMs generate electricity regardless of the orientation of their surface on the Sun, however, with different efficiency, therefore, solar tracking systems are used to maximize the electric energy obtained from the direct component of solar radiation [3]. Solar trackers began to be used when photovoltaic systems began to be used to generate large amounts of electricity. First of all, they are used in conditions of a large surface area of the FEM (fields), because in this way the production of electricity by photovoltaic panels is increased due to the fact that the panels are always located as perpendicular as possible to the sun's rays. Currently, there are various technologies that are used to develop solar tracking systems that guarantee increased efficiency of capturing the sun's rays. This leads to an increase in the production of electrical energy by the entire complex. In fig. 1.10 shows different models developed by different manufacturers.

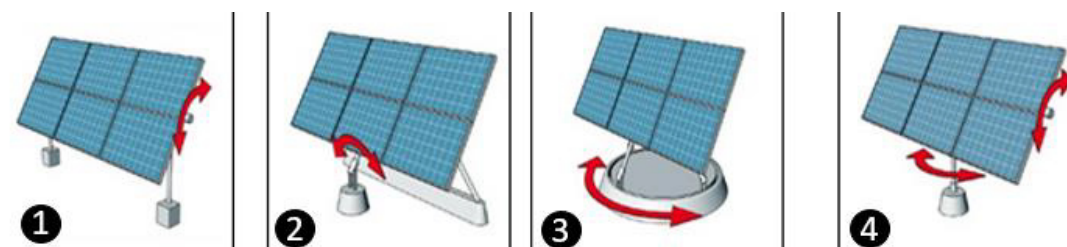


Figure 1.10 – Types of solar tracking systems

As part of the research, tracking systems have been evaluated in terms of their cost-benefit ratio in the PV generation process, and a generation increase of up to 35% is reported over the use of fixed panels due to the fact that these trackers have two axes, the PV modules are always perpendicular to the Sun.

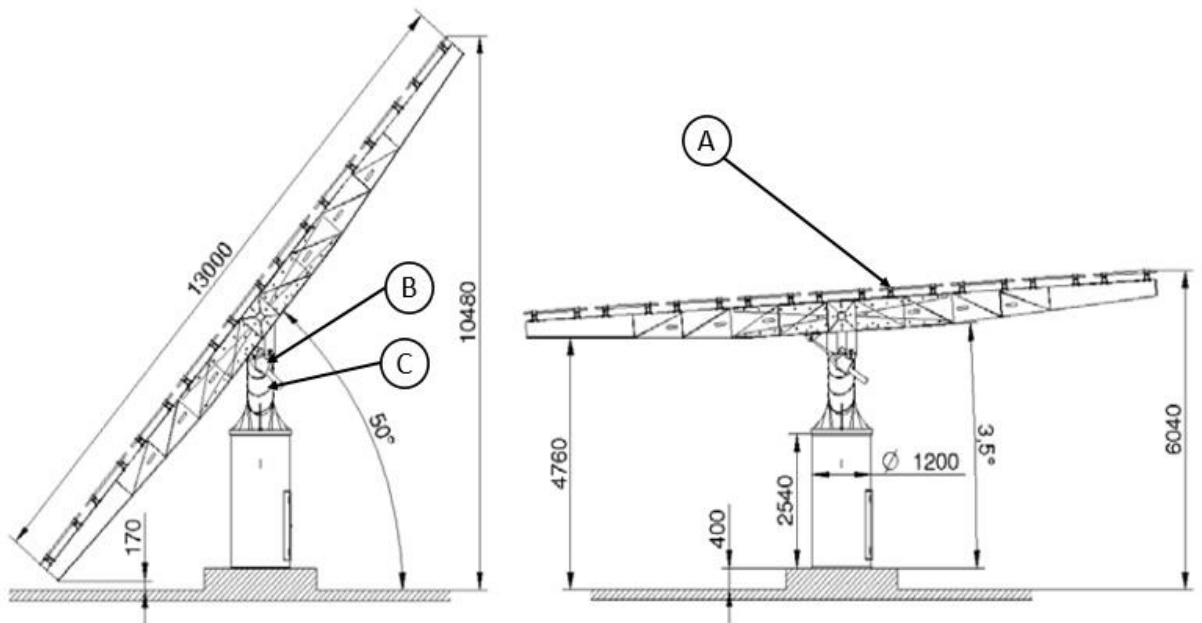


Figure 1.11 – Biaxial Solar Tracker Parts and Components (30kW Dual Axis Tracker)

In fig. 1.11 shows the main parts that make up a two-axis solar tracker, where A is a photovoltaic generator consisting of connected solar panels, point B shows the motor responsible for moving along the path described by the sun, and point C shows the motor, which controls the height so that the irradiance is received perpendicularly at any time of the year. The elevation angle is from 15 to 90°, and the rotation speed is 0.52 - 0.62°/s. Currently, there are various manufacturers and models of solar trackers on the international market. Table 1.1 shows some examples of current costs for these systems depending on the model. The data presented in Table 1.1 correspond to the data for the month of May 2024.

Table 1.1

Costs in the international market of solar trackers by model

Type	Cost, \$	Efficiency, %
1	0.08 BA – 0.14 BA	10% - 25 %
2	0.08 BA – 0.14 BA	10% - 25 %
3	-	10% - 20 %
4	0.19 BA – 0.25 BA 0.40 BA – 0.50 BA*	30% - 45 %

* Two-axis solar tracking systems with GPS - satellite navigation system

The main manufacturers of solar trackers are such companies as: NEXTracker, ArrayTechnologies, PV Hardware, ArctechSolar, Soltec, NClave, ConvertItalia, STiNorland, GameChangeSolar, SunPower. The NEXTracker company is the leader in the rating of manufacturers of photoelectric trackers on the world market. Today, this company supplies 29% of the total supply of solar trackers. Another major manufacturer of the last two years is the company ArrayTechnologies, followed by PV Hardware (PVH), ArctechSolar and Soltec takes the fifth place in this rating.

The equation for determining the effectiveness of monitoring systems in comparison with stationary systems:

$$Gan = (Edm - Edf / Edf) * 100, \quad (1.1)$$

where: Edm – Electricity supplied by the mobile system, Edf – Electricity of the stationary system, Gan – energy gain.

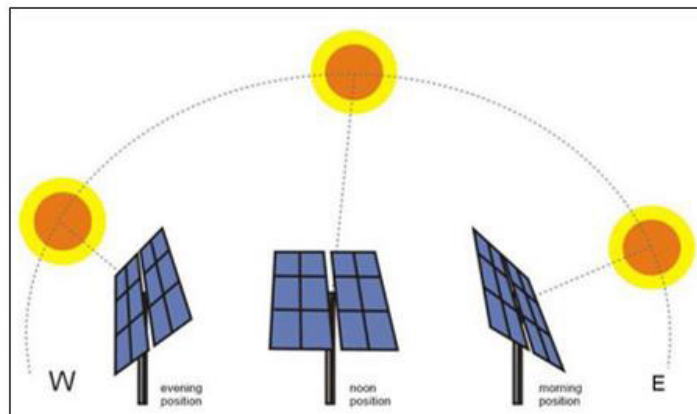


Figure 1.12 – Solar tracking system

The angles that determine the movement of the solar tracker in horizontal movement (α) and vertical movement (γ) are equal to:

$$\alpha = \sin^{-1}(\cos(\varphi) * \cos(\delta) * \cos(w) + \sin(\delta) * \sin(\varphi)), \quad (1.2)$$

$$\gamma = \tan^{-1}(\sin(w) \tan(\delta) * \cos(\varphi) - \sin(\varphi) * \cos(w)), \quad (1.3)$$

where: δ - solar declination angle ($^{\circ}\text{F}$); w - solar time angle ($^{\circ}\text{F}$); α - solar elevation angle ($^{\circ}\text{F}$); γ - Azimuth angle ($^{\circ}\text{F}$); φ is the geographical latitude of the place ($^{\circ}\text{F}$).

Studying the various solar power plant technologies currently in existence provides sufficient information needed to understand the various designs and components that make up these systems. It is necessary to know the parameters of each of the electrical and mechanical elements, because this information affects the adoption of technical decisions that allow engineers and technicians to repair them in case of failures, as well as increase their efficiency, provide maintenance and extend the life of the complexes.

Solar energy is presented as an effective and economical alternative compared to other traditional forms of electrical energy production. All this has increased the

need for wider use of solar energy. In any case, the first condition that a solar energy system must meet is to collect the maximum possible amount of energy in a given location. Today, the scientific and engineering community is looking for alternatives to fossil fuels that use renewable energy sources. As of the end of 2022, 6,320 MW were introduced into the energy supply system of Ukraine. The share of FES at the beginning of 2024 is about 4.8% of the total generation of Ukraine. However, many of these Photovoltaic Plants (PVs) in the country are not producing the expected levels of energy according to the estimates obtained by the project companies. The main reason for such a difference between design data and actual data is the low efficiency of the components included in the FES.

The solar panels were found to have an average power deviation of 8% when the manufacturer of these solar modules specified $\pm 3\%$ in the data. The 2.5MW solar power plant has 10,400 240W solar panels with a nominal power deviation of $\pm 3\%$, and according to the research results, the average solar panel power deviation is -8% . This means that the actual output of the solar generator on a 2.5MW plant is limited to 2.3MW, which is about 20kW less because of this problem. However, the efficiency of converting solar energy into electrical energy is currently at a low level. The cost of electricity production using FES is very high, but in recent years there has been a trend of decreasing costs.

Two ways of maximizing the electricity received from a photovoltaic installation are widespread:

- improvement of the structure of the photovoltaic panel aimed at increasing its productivity;
- increasing the amount of solar radiation captured by the panel.

To achieve the best result when applying the second method, the area of the photovoltaic panel must remain perpendicular to the radiation of the light source. For this, solar tracking systems are used in photovoltaic systems. Today, PV panels have a

typical efficiency between 12% and 25% and an approximate output in the range of 120 - 420 W/m² depending on the efficiency of the PV panel.

The use of solar tracking systems at the solar power plant of the electrical complex will increase the reliability and efficiency of electricity generation. Taking into account the above, the goal of this Alvra work is to increase the production of electricity produced by FES with the use of monitoring systems and, taking into account the climatic and socio-economic conditions, to improve the quality of electricity for its consumers.

Grid-connected solar photovoltaic installations are installations in which the generated energy is directly fed into the electrical grid. This type of solar energy installation works like a power plant for electricity. The hydropower company is responsible for the operation and maintenance of solar power plants throughout Ukraine.

In fig. 1.13 shows the schematic diagram of the electrical complex.

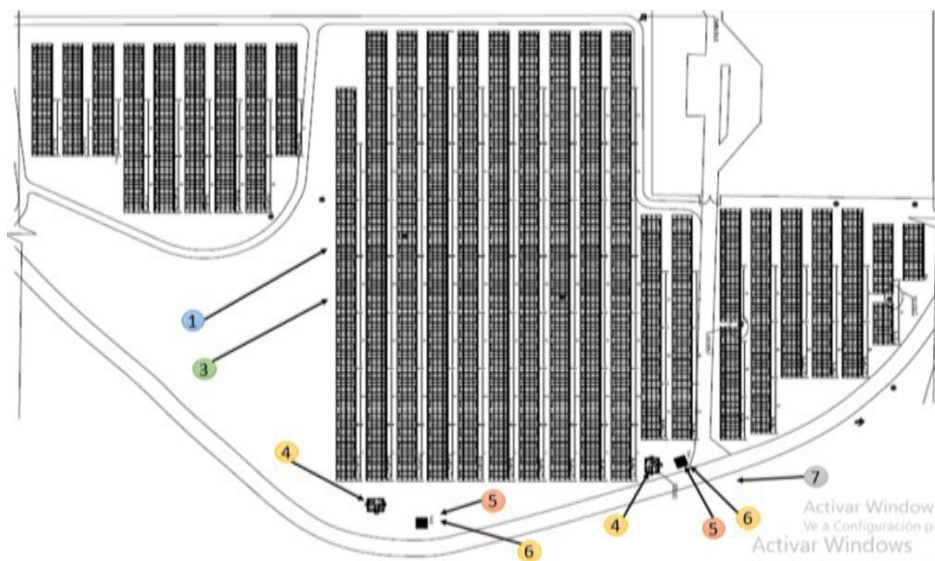


Figure 1.13 - Structure of a photovoltaic station: 1- Solar generator. 2. Panels of electrical connections between the generator and the inverter. 3. Three-phase inverters. 4. General distribution panel. 5. Three-phase transformers. 6. Reduction main substation.

1.5 Conclusions by section and setting tasks

Solar radiation reaching the Earth's surface depends on many factors. First of all, from the latitude and longitude of the area. In addition, the value of solar radiation depends on climatic and geographical features, the state of the atmosphere, the height of the Sun above sea level, etc.

A solar photovoltaic plant with a capacity of 8 MW operates on a plot of 17.7 hectares in the Novosanzhar district of the Poltava region.

At the current stage of increasing the energy efficiency of the mentioned station, it is necessary to reorganize the technological processes due to the use of modern equipment, connection schemes and methods that meet the requirements of energy efficiency.

The use of more efficient photovoltaic cells or tracking systems in a solar plant will increase the reliability, efficiency and production of energy in the area. But there are a number of tasks that must be completed to increase the efficiency of the solar generators of the 8 MW photovoltaic plant.

The purpose of the work is to increase the energy efficiency of the electrotechnical complex, which includes a solar power plant, taking into account climatic and technological factors.

To achieve the goal, the following tasks must be solved:

1. To analyze the existing approaches to the formation of the structure of an electrical complex containing a solar power plant.
2. Determine the set of climatic factors that are taken into account when estimating the amount of energy generated by the substation.
3. To carry out a factor analysis of the climatic variables of the Poltava region.
4. To develop mathematical and computer models of the electrical engineering complex, which includes a solar power plant, allowing to estimate the amount of energy generated, depending on its structure and parameters of the generation system.

5. To form a function that reflects the maximum possible value of electricity generation depending on the limitations of possible climatic and technical factors.

6. Check the adequacy of the developed approach to the design of the electrical complex on a computer model.

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ
СТАНЦІЇ НОВОСАНЖАРСЬКОЇ СЕЛИЩНОЇ ГРОМАДИ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Виконав:

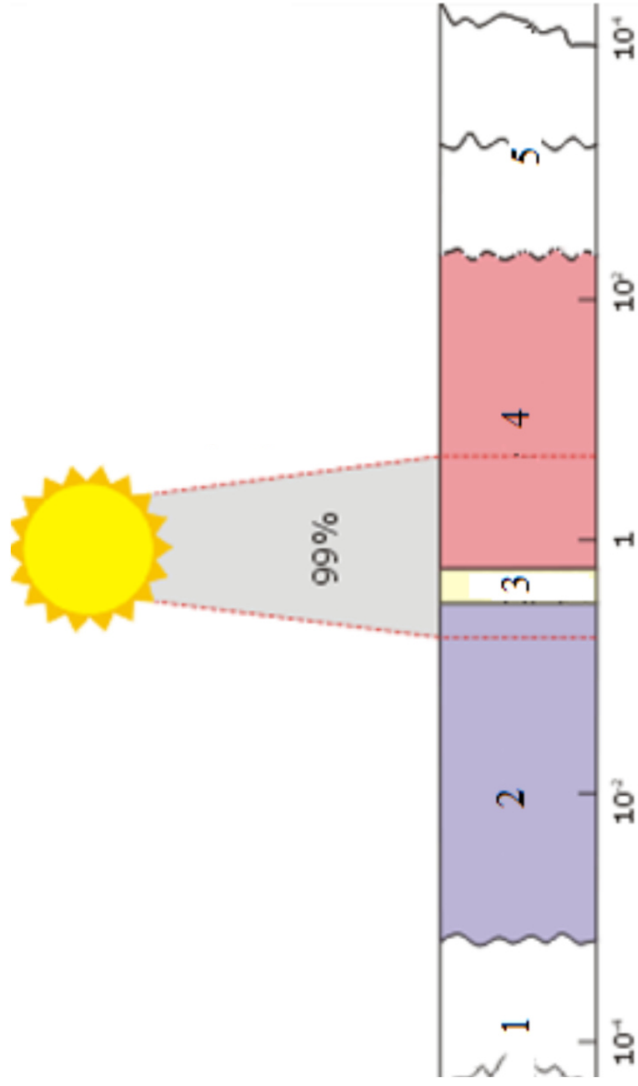
Д. В. РИБКА

Керівник:

К.Т.Н., ДОЦЕНТ

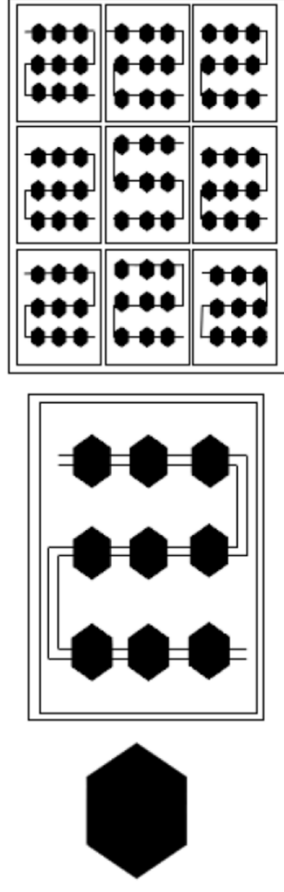
М. К. Бороздін

Полтава 2024



Спектральний розподіл сонячного випромінювання:

- 1 - Рентгенівські промені;
- 2 - Ультрафіолетові промені;
- 3 - Спектр видимого випромінювання;
- 4 – Інфрачервоні промені;
- 5 - СВЧ-промені

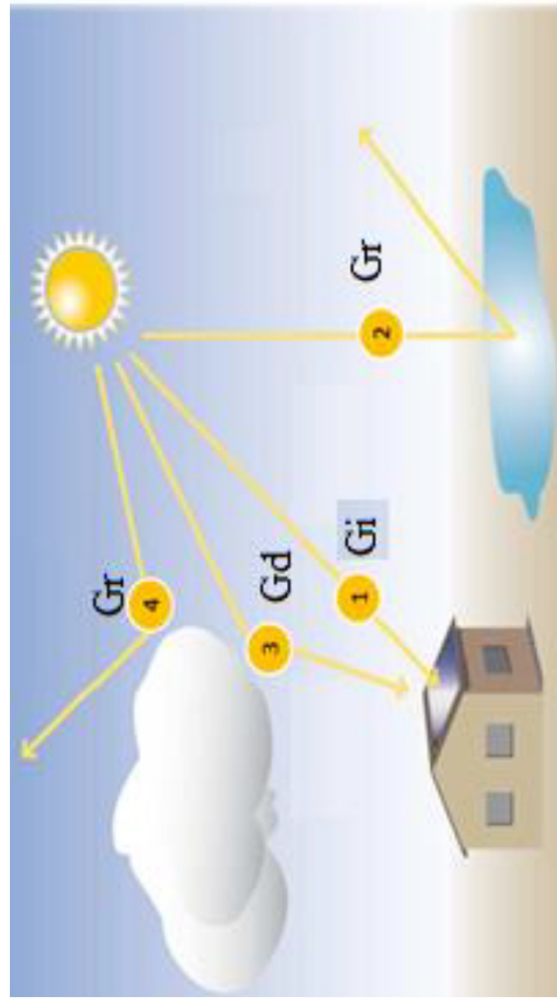


а)

б)

в)

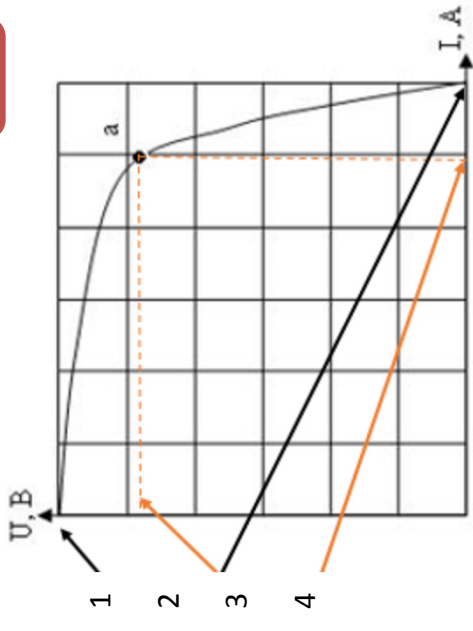
- а) Сонячна комірка,
- б) Сонячний модуль,
- в) Сонячна батарея



- Gi– Пряме сонячне випромінювання,
- Gr – Відбите сонячне випромінювання,
- Gd – Розсіяне сонячне випромінювання

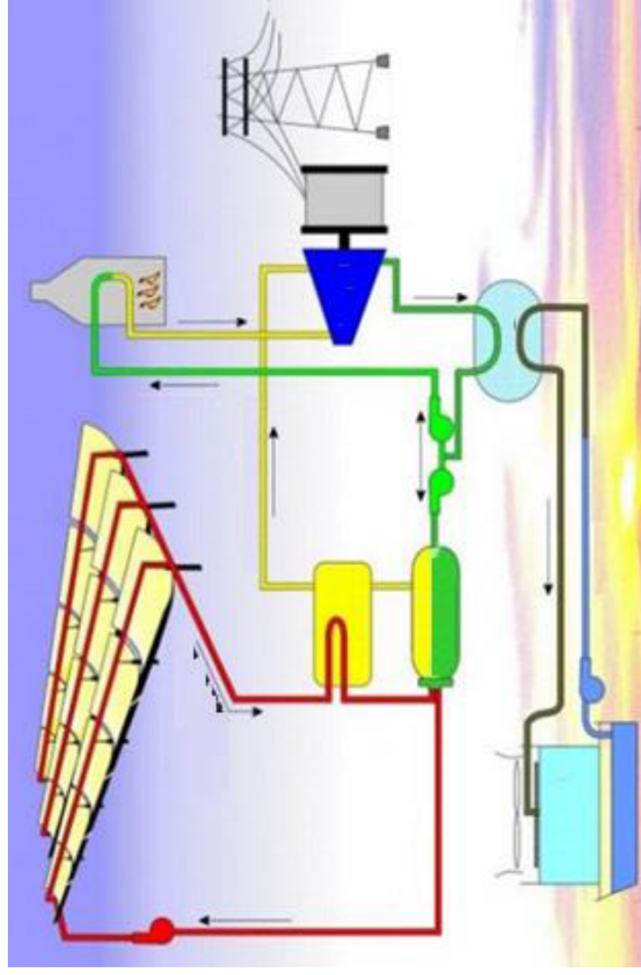


Типи сонячних модулів, які найбільше використовуються сьогодні

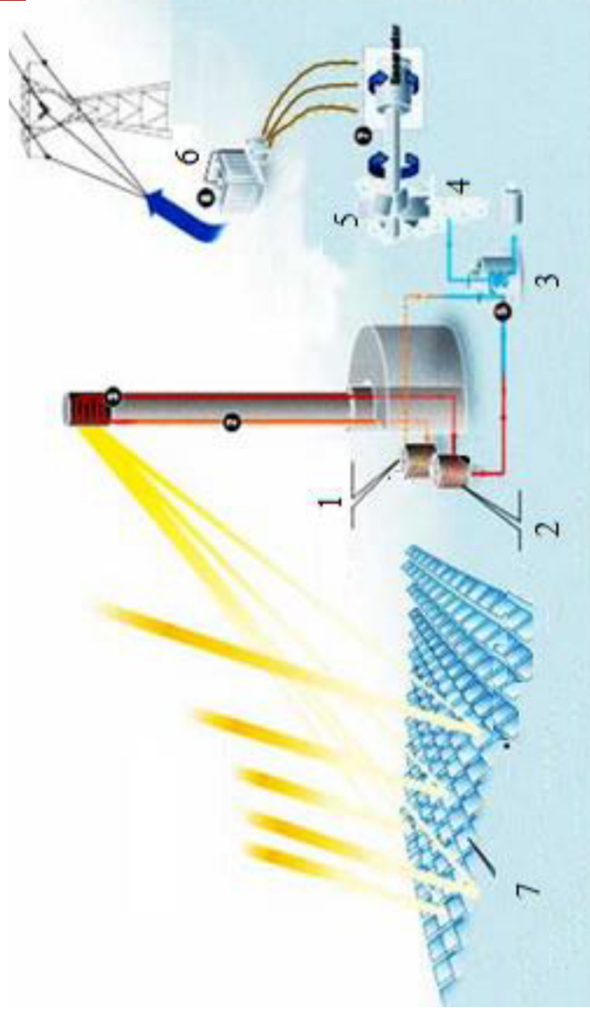


Вольт – амперна характеристика сонячного модуля де: 1- напруга на затискачах (V); 2 – струм короткого замикання за нормальних умов роботи (A), 3- напруга за умов максимальної потужності (V); 4 – струм максимальної потужності (A).

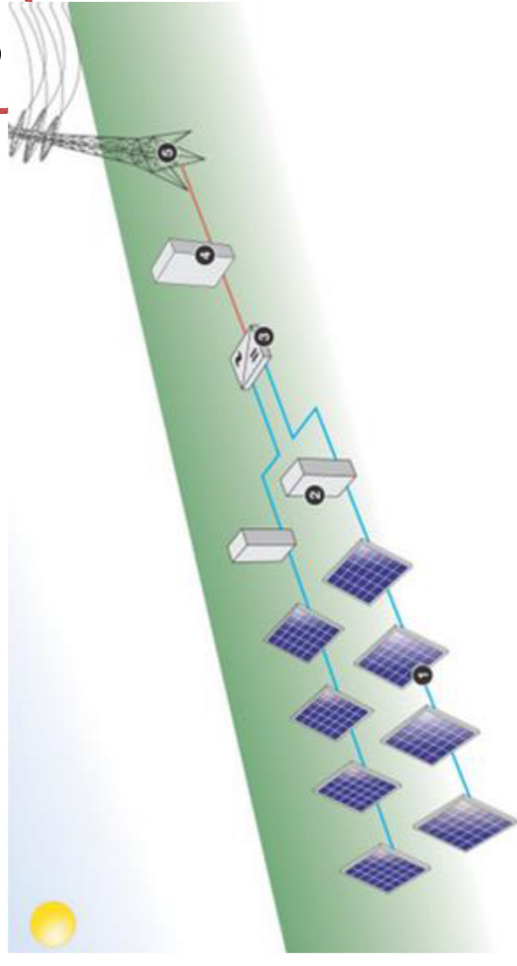
Графік ефективності сонячних елементів та потужності панелей залежно від технології, що використовується



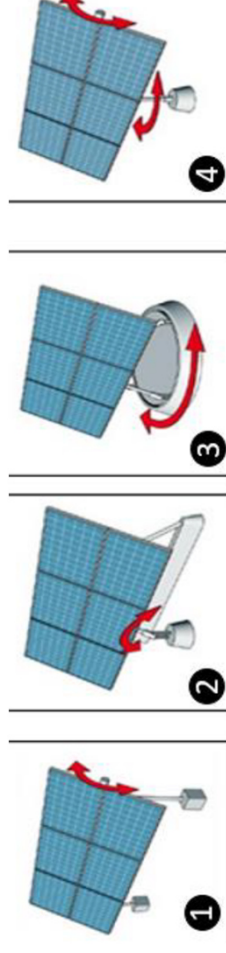
Параболічні концентратори сонячного випромінювання



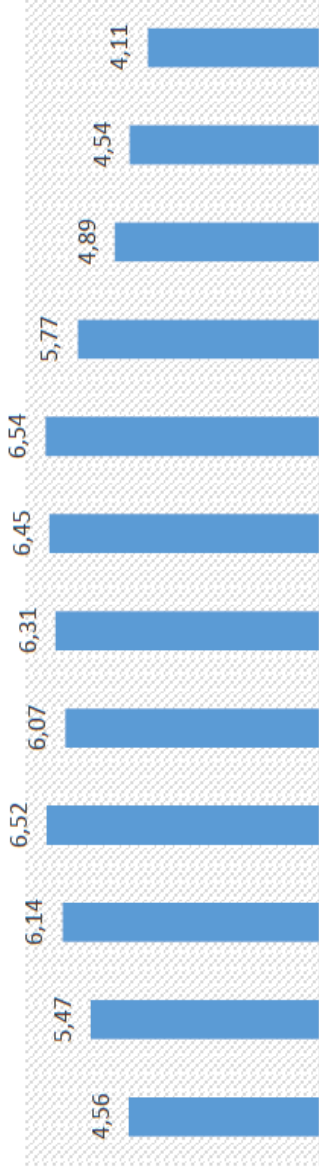
Сонячна електростанція баштового типу. 1 - Холодні солі, 2 - Гарячі солі, 3 - Теплообмінник, 4 - Водяна пара, 5 - Турбіна, 6 - Трансформатор



Сонячна електростанція (ФЕС), 1 – фотоелектричний генератор, 2, 4 – електричні щити, 3 – інвертор, 5 – електрична мережа автономного об'єкта

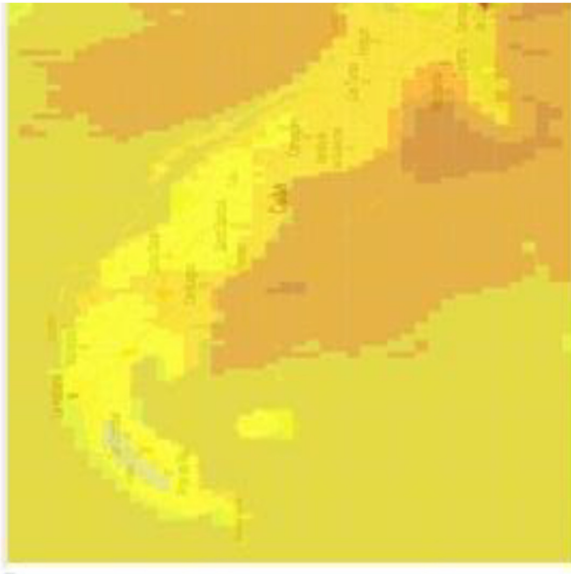


Типи систем стеження за Сонцем



Середньодобова радіація на горизонтальній площині (кВт/м²)
за річний сонячний цикл

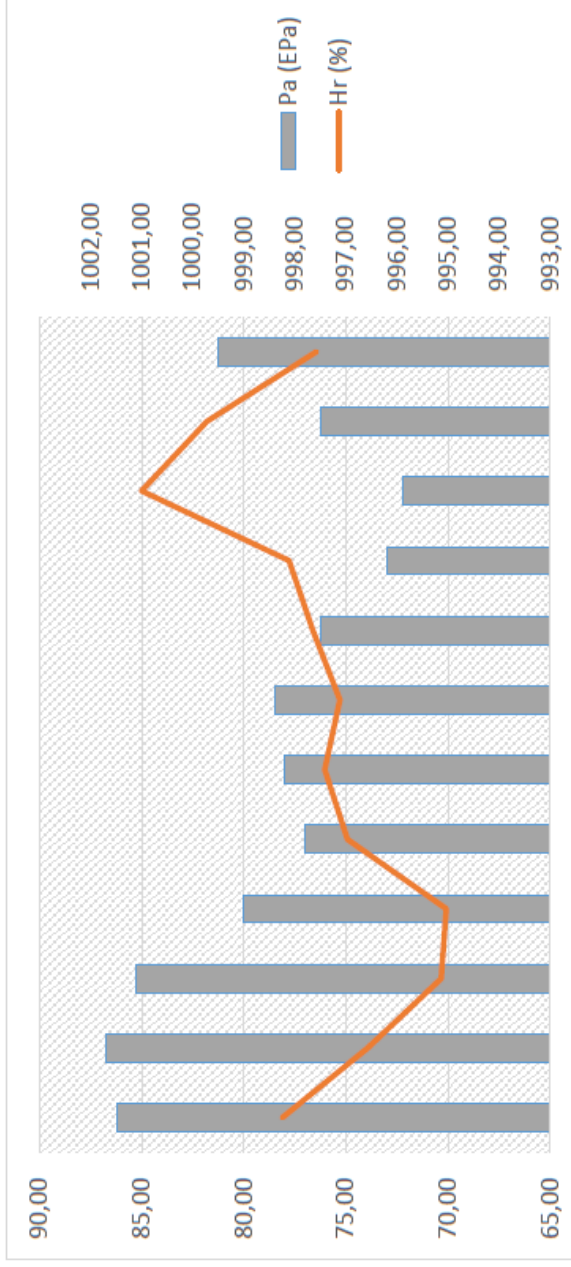
DNI SUNY High Resolution
(kWh/m sq. per day)



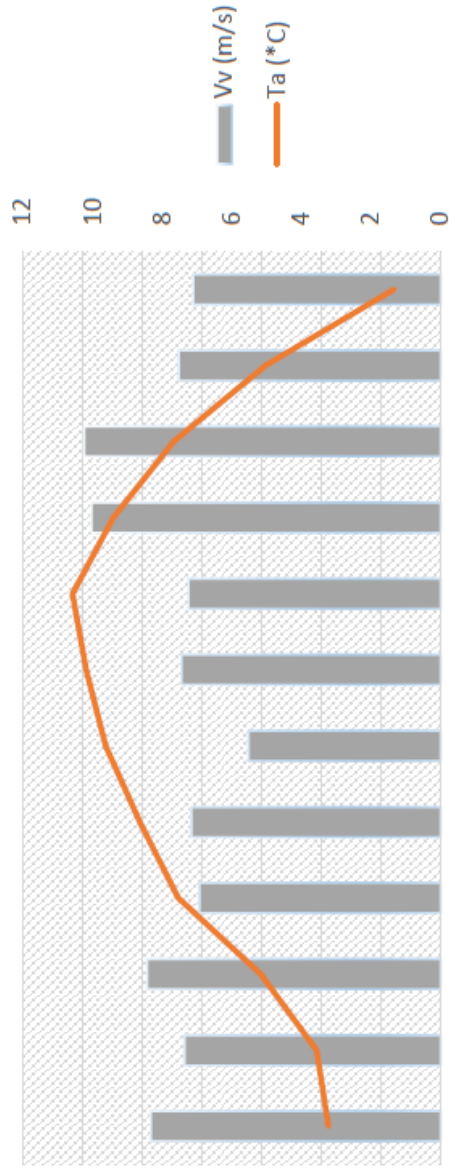
ІНТЕНСИВНІСТЬ ІНСОЛЯЦІЇ на
території Новосанжарського
району



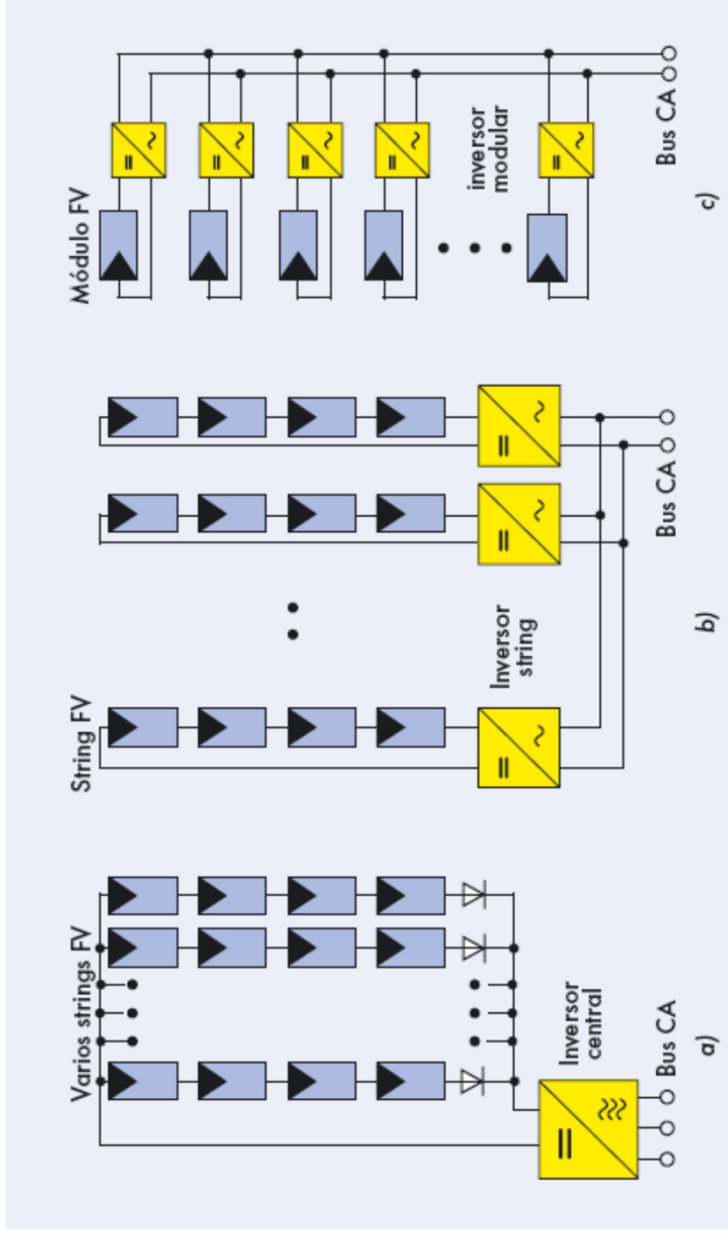
Усереднена кількість годин сонячного світла на день для
Новосанжарського району Полтавської області



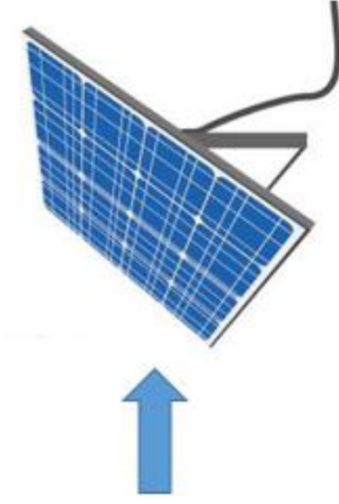
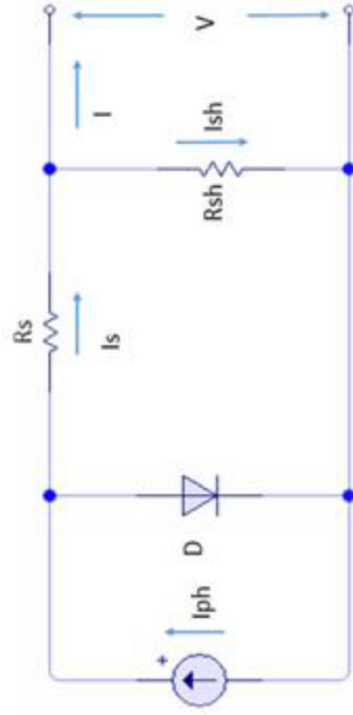
Середньодобова відносна вологість (%) та середньодобовий атмосферний тиск (Па) на території Новосанжарського району Полтавської області



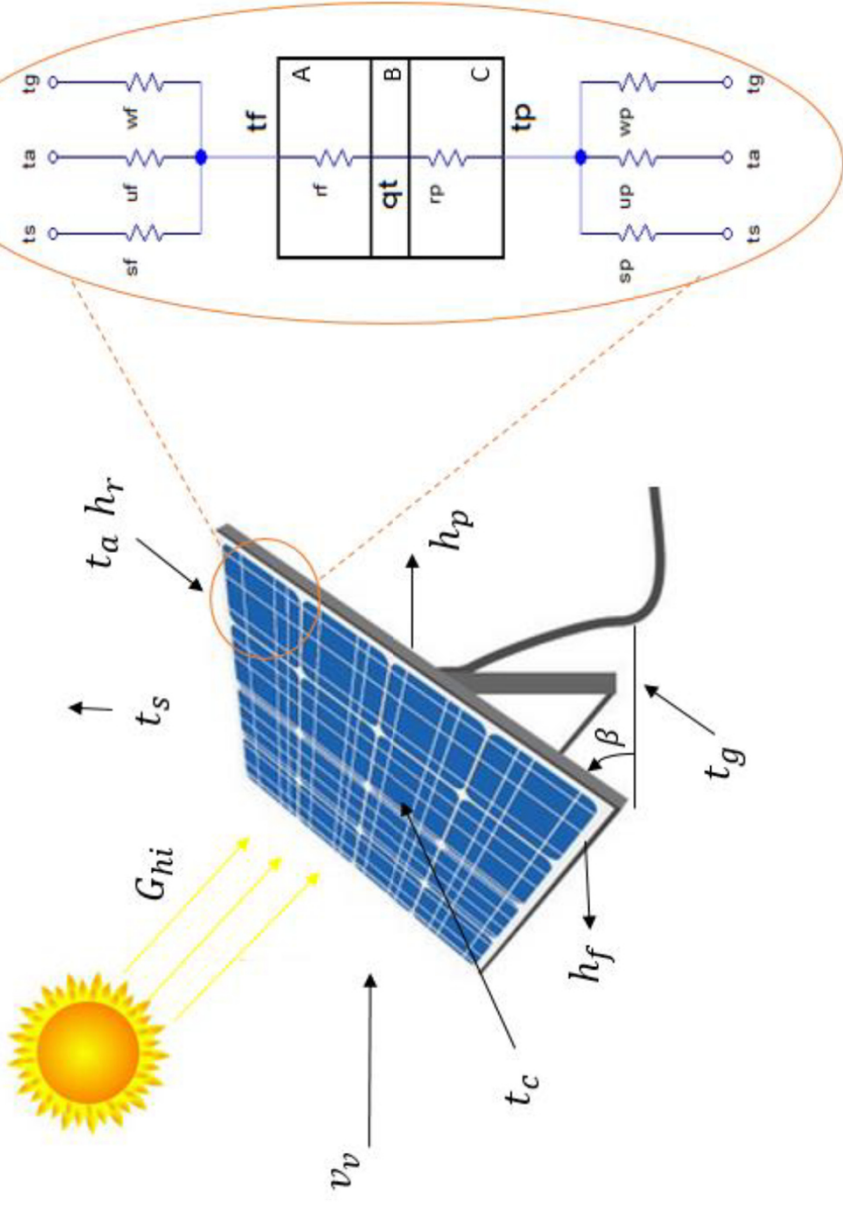
Середньомісячна швидкості вітру (м/с)



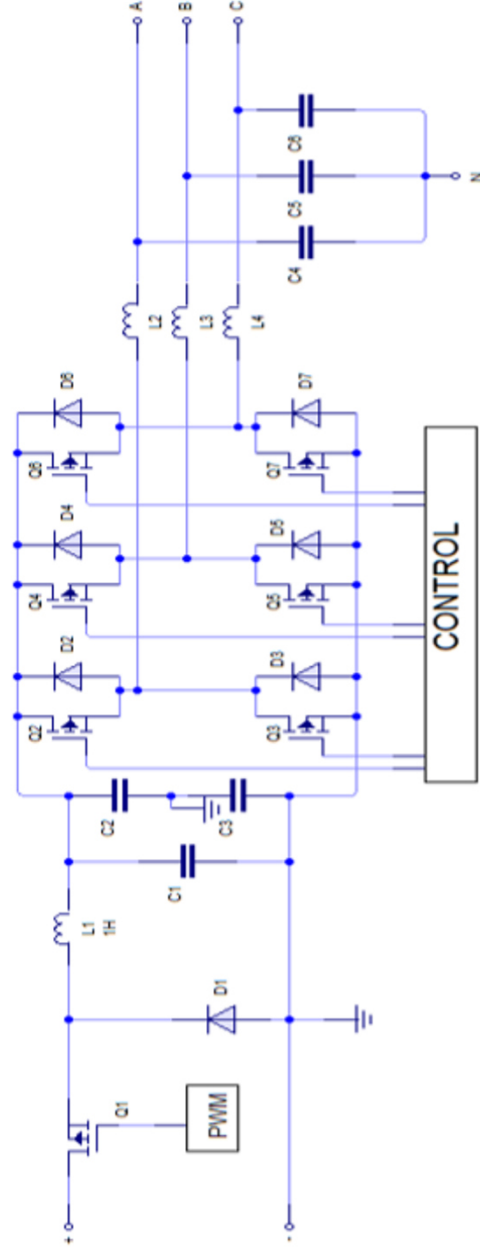
Підключення інвертора відповідно до його номінальної потужності, а) Центральний інвертор, в) струнний інвертор, с) модульний інвертор

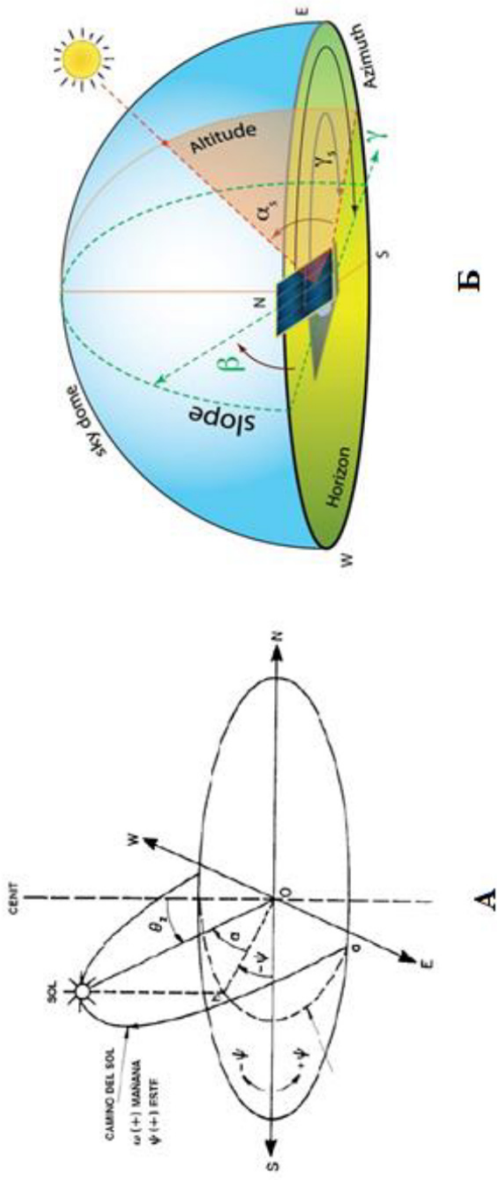


Еквівалентна схема сонячної батареї:
 R_{sh} – шунтуючий опір, R_s – послідовний опір, D – діод

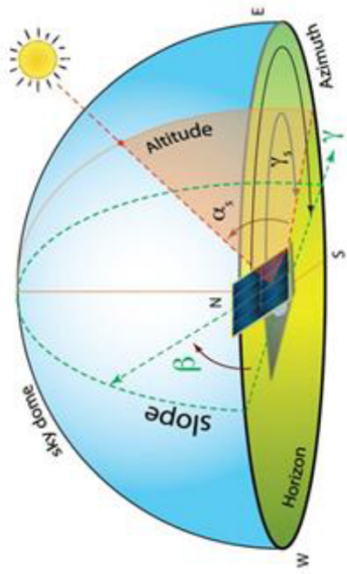


Теплова модель фотоелектричного модуля

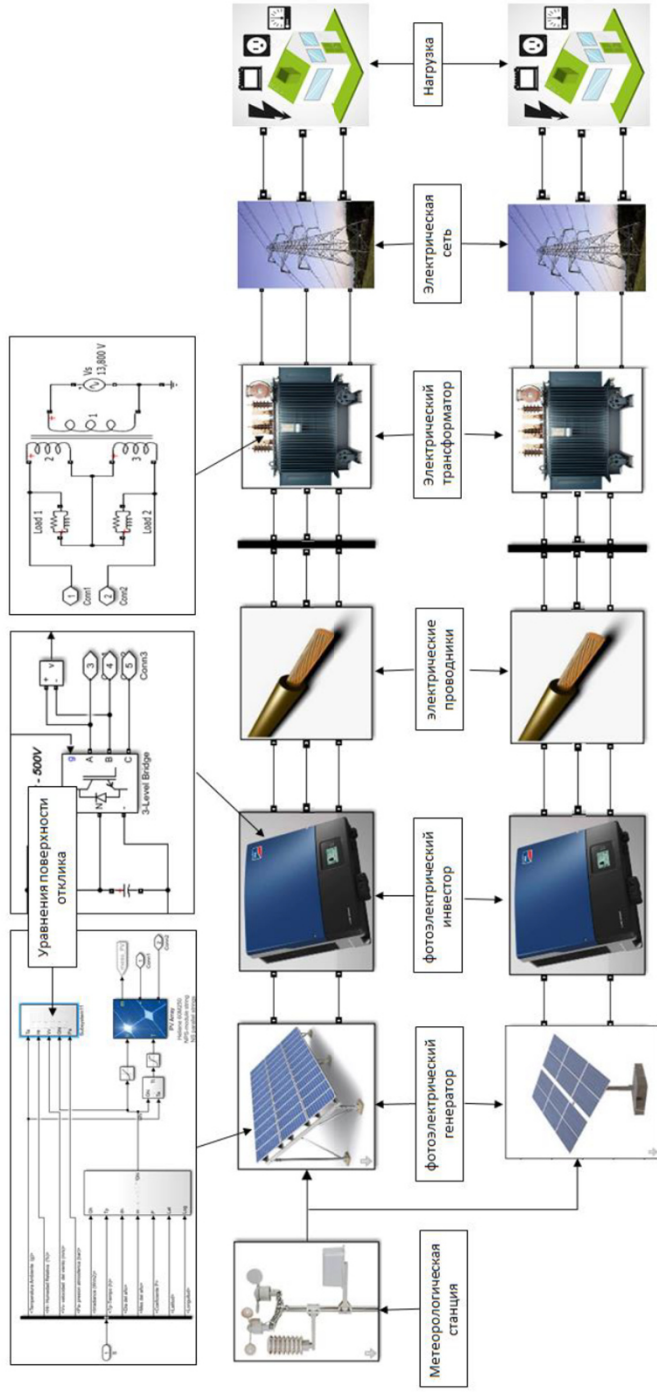
Електрична схема
трифазного інвертора



Б

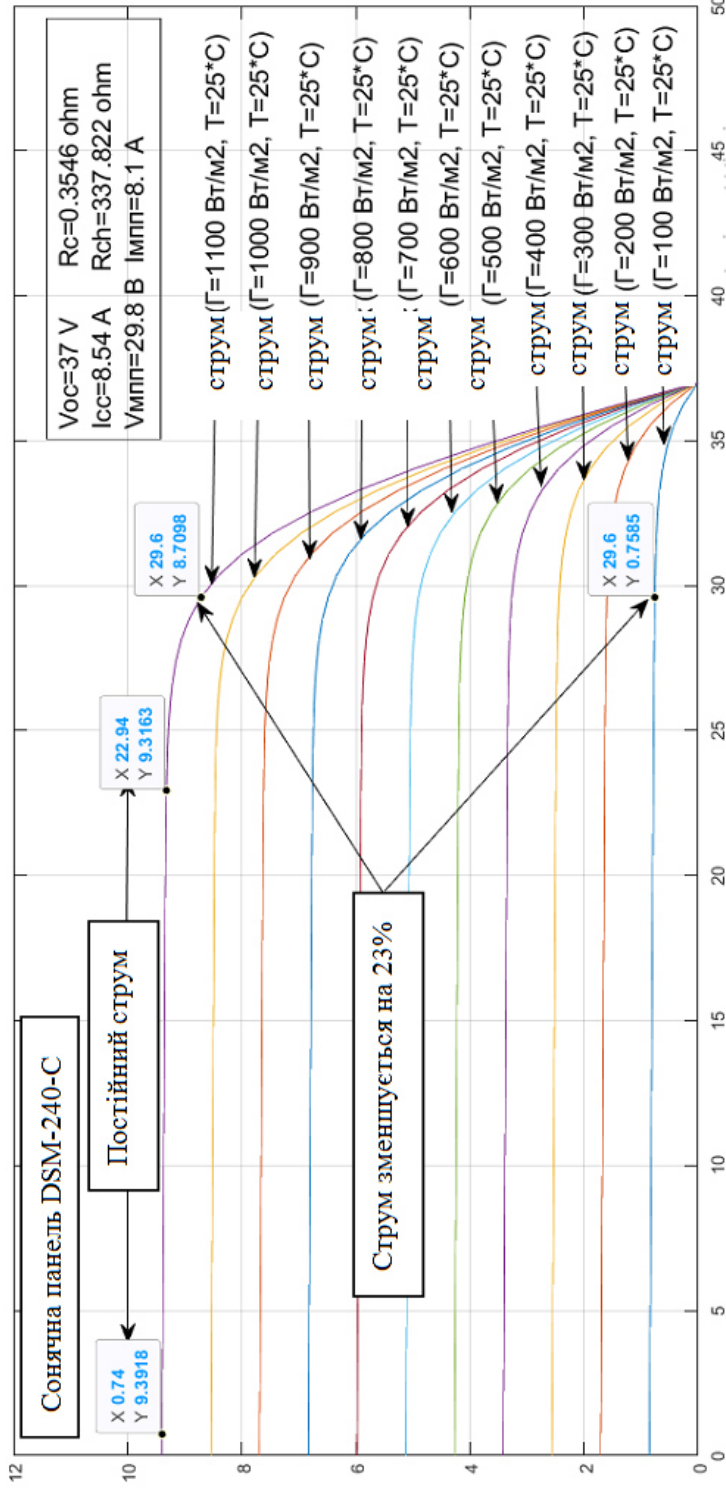
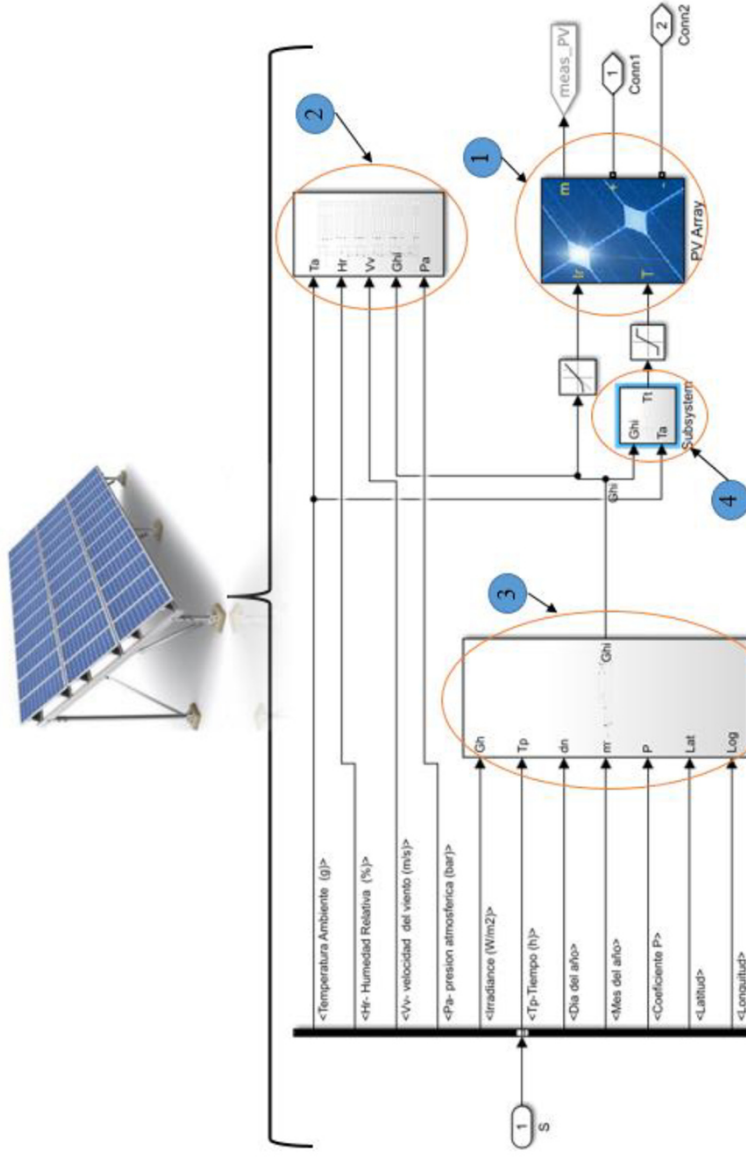


Рух Сонця поверхню Землі

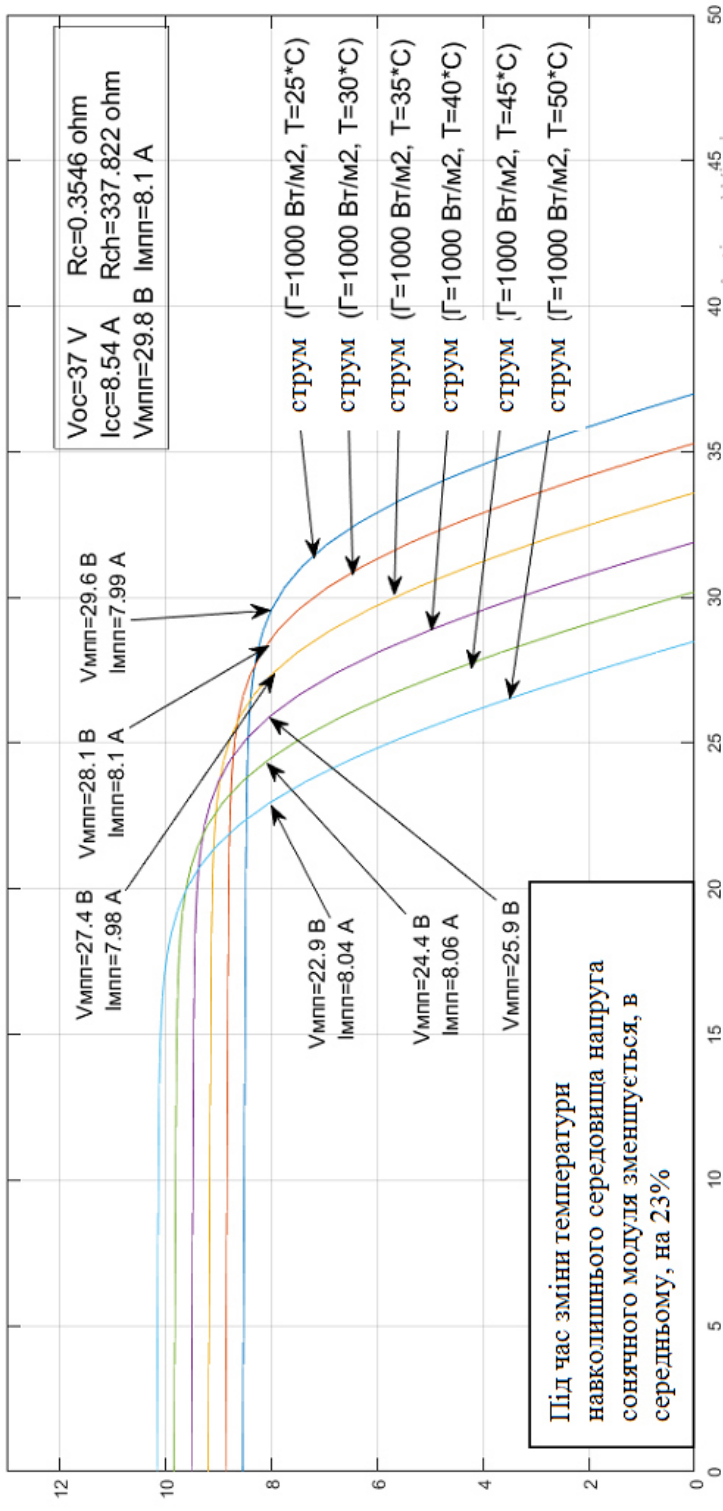


Модель Matlab /
Simulink
комплексу з
фотоелектричними
панелями

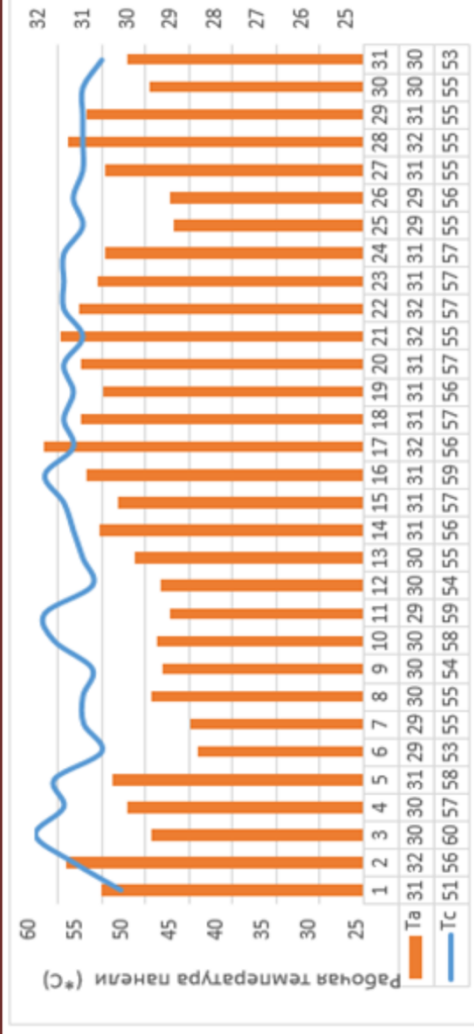
Схема сонячного модуля (ДСМ - 240-С) в Matlab / Simulink



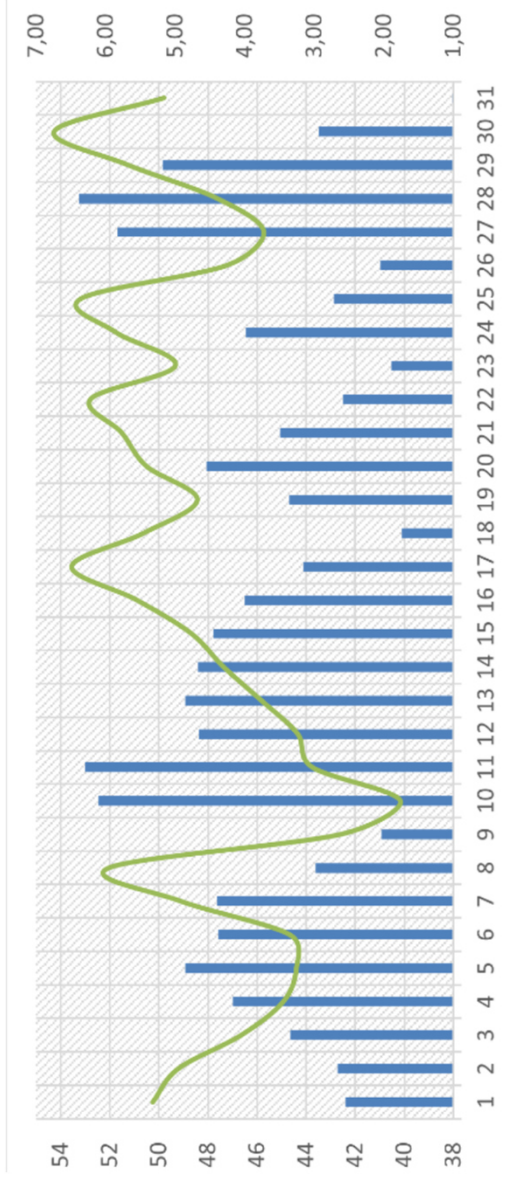
Вольт-амперна характеристика фотоелемента, що працює з різним сонячним випромінюванням



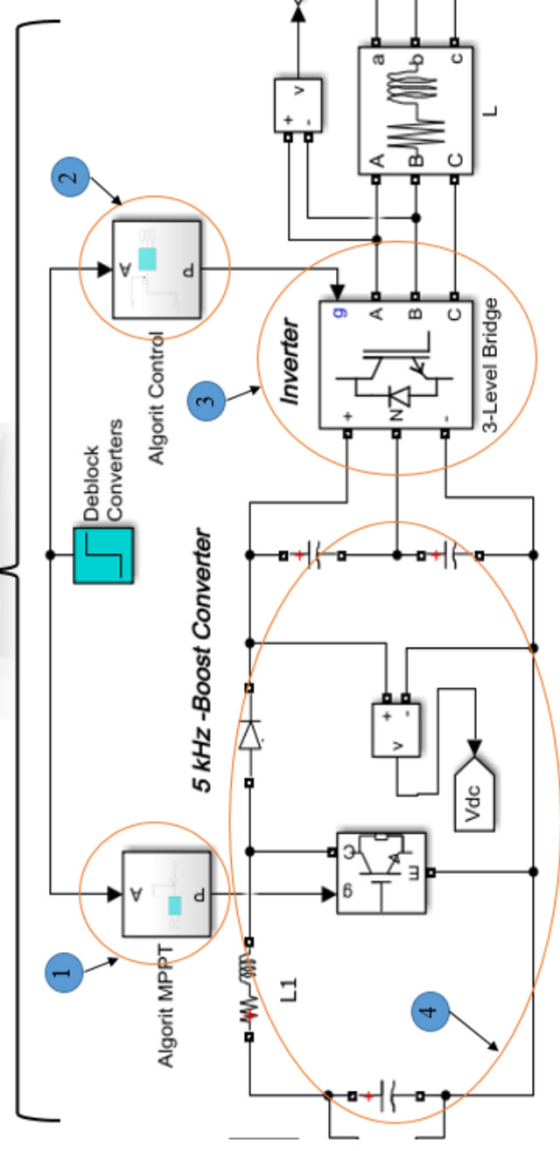
Вольт-амперна характеристика фотоелемента, що працює за різних робочих температур



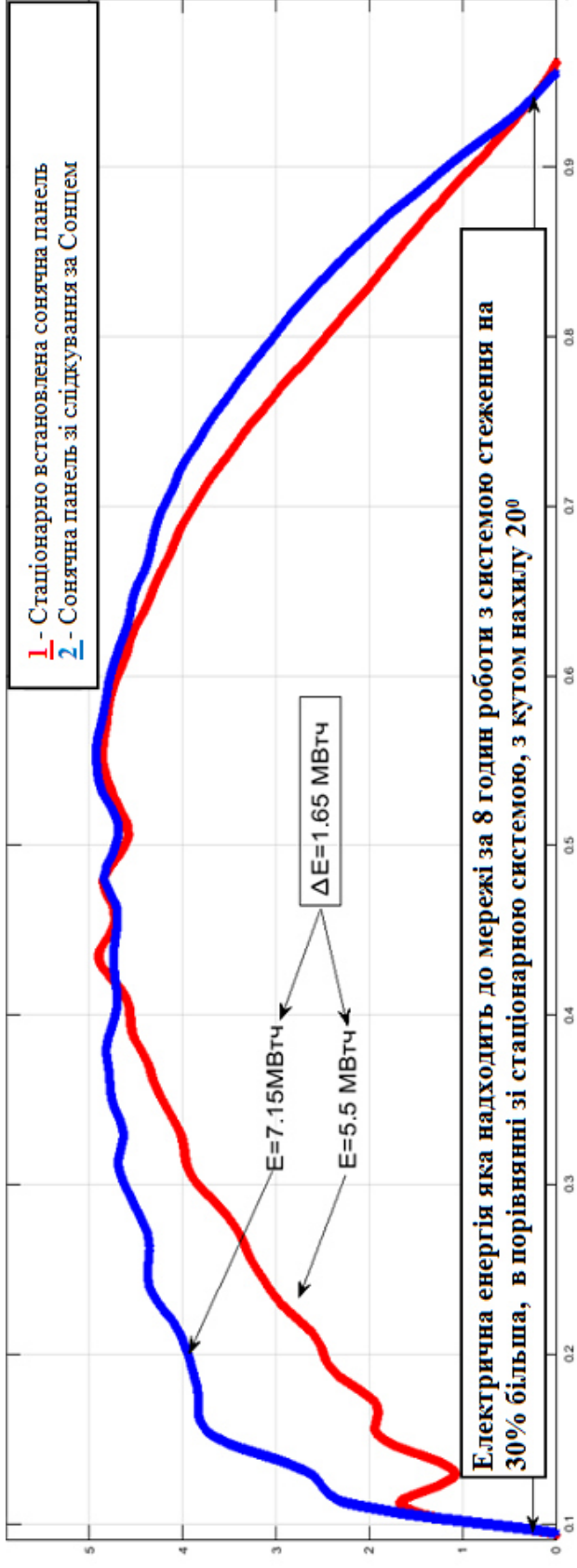
Результати моделювання в МАТЛАВ робочій температурі сонячного генератора



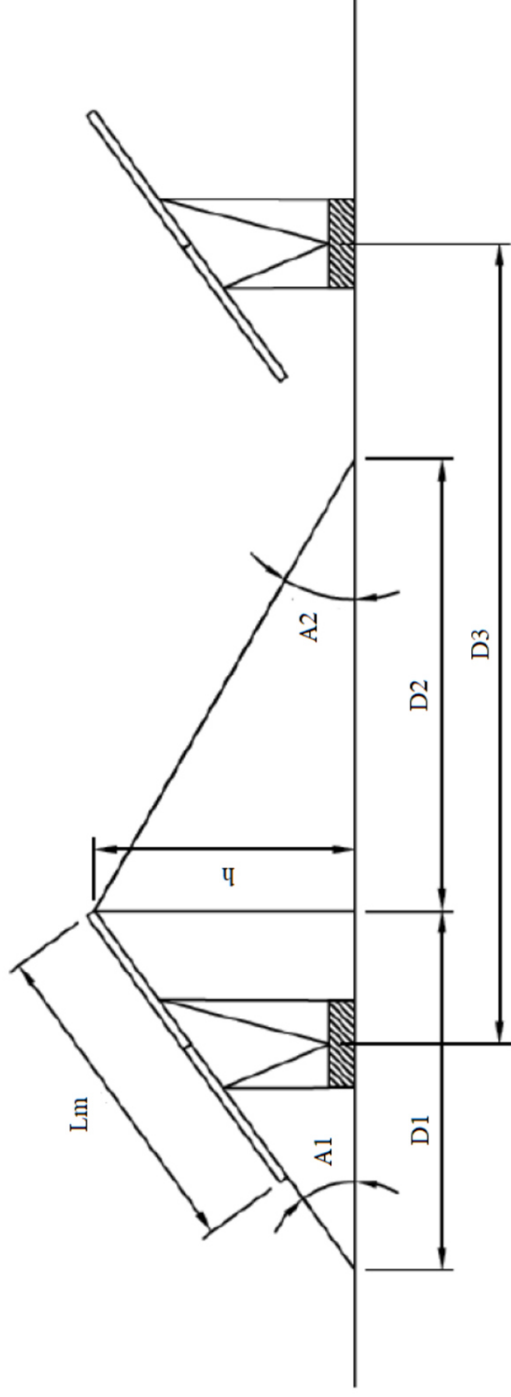
Залежність робочої температури сонячної панелі від швидкості вітру



Подання математичної моделі трифазного інвертора в Matlab/Simulink



Порівняння енергій, отриманої системою стеження за Сонцем та стаціонарною сонячною системою



Положення опор сонячного генератора