

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня освіти на тему:

**«Моделювання поточної потужності та денної продуктивності
фотоелектричної панелі за ясного неба»**

Виконав: студент 6 курсу

групи Ен-61 спеціальності

141 „Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка”

(шифр і назва спеціальності)

_____ Стефанишин О. В..

Керівник: _____ ГАЛЬЧАК В. П.

Рецензент: _____

ДУБЛЯНИ 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

_____ (підпис)

к.т.н., доцент Сиротюк С. В.
(вч. звання, прізвище, ініціали)

" ____ " _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Стефанишину Олесандру Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Моделювання поточної потужності та денної продуктивності фотоелектричної панелі за ясного неба», керівник роботи:
к.ф-м.н., доцент Гальчак В.П.
(наук.ступінь, вч. звання, прізвище, ініціали)

затверджені наказом Львівського НУП 616/к-с 12.09.2024

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 10.12.2024 р.

3. Вихідні дані

технічна документація, науково-технічна і довідкова література

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

Вступ

4.1. Енергетика сонячних елементів і панелей

4.2. Типові режими інсоляції та роботи ФЕУ

4.3. Моделювання показників ефективності сонячної панелі протягом дня

4.4. Охорона праці у надзвичайних ситуаціях.

4.5. Обґрунтування економічної доцільності моделювання роботи сонячних панелей

Висновки і пропозиції

Перелік джерел посилання

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Графічний матеріал подається у вигляді презентації

6. Консультанти розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
3	<i>Городецький І. М. к.т.н., доцент</i>			

7. Дата видачі завдання: 12.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Енергетика сонячних елементів і панелей</i>	12.09.2024 – 30.09.2024	
2	<i>Типові режими інсоляції та роботи ФЕУ</i>	02.10.2024 – 25.10.2024	
3	<i>Моделювання показників ефективності сонячної панелі протягом дня</i>	21.10.2024 – 22.11.2024	
4	<i>Охорона праці у надзвичайних ситуаціях</i>	25.11.2024 – 25.11.2024	
5	<i>Обґрунтування економічної доцільності розробки</i>	26.11.2024 – 30.11.2024	
6	<i>Завершення оформлення ілюстративної частини роботи</i>	02.12.24 – 04.12.24	
7	<i>Завершення роботи в цілому</i>	05.12.24 – 10.12.24	

Студент _____ Стефанишин О.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Гальчак В. П.

УДК 620.92:621.383.51

Стефанишин О. В. «Моделювання поточної потужності та денної продуктивності фотоелектричної панелі при ясному небі». Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет природокористування, 2024 р.: 52 с. текстової частини, 1 таблиця, 21 рисунок, 18 джерел посилання.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка методики моделювання роботи сонячних панелей у природних умовах експлуатації для з оцінкою енергетичних показників їх ефективності у залежності від рівня освітленості і поточної температури.

Для досягнення поставленої мети, проаналізовані особливості енергетичних перетворень у сонячних елементах і панелях та їх кількісної оцінки. Опрацьовані теоретичні засади оцінки та розрахунку показників енергетичної ефективності сонячних елементів та панелей у природних умовах їх експлуатації. Адаптовано методики кількісної оцінки природних потоків сонячної енергії до фотоелектричних панелей протягом дня та їх моделювання у рамках наближення ясного неба Європейського Атласу сонячної радіації (ESRA). Розроблено методику моделювання енергетичних характеристик фотомодулів у природних умовах експлуатації за показниками їх ефективності, наведеними у їх технічній документації за двома стандартами тестування. Методику чисельного моделювання реалізовано у програмному середовищі Ексель, а його результати представлені у вигляді графіків залежності параметрів ефективності від години дня за локальним сонячним часом при шести варіантах нахилу фотомодулів до горизонту. Їх зручно використовувати для порівняння з реальними показниками роботи фотоелектричних установок як у режимі реального часу так і прогнозування у довільний день року.

Ключові слова: сонячна панель, фотомодуль, сонячна енергія, моделювання, наближення ESRA, Ексель, коефіцієнт заповнення BAH, точка максимальної потужності, енергетична ефективність

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 ЕНЕРГЕТИКА СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ І ПАНЕЛЕЙ	7
1.1 Актуальність теми кваліфікаційної роботи	7
1.2 Енергетика фотоелектричного перетворення	9
1.3 Структура та енергетичні параметри сонячних панелей	15
2 ТИПОВІ РЕЖИМИ ІНСОЛЯЦІЇ ТА РОБОТИ ФЕУ	17
2.1 Стандарти тестування сонячних панелей	17
2.2 Зміна параметрів ВАХ сонячних панелей у реальних умовах	18
2.3 Модель прямого потоку сонячної радіації протягом дня у наближенні ясного неба	20
2.4 Інтегральні показники ефективності сонячної панелі	24
3 МОДЕЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ ПРОТЯГОМ ДНЯ	28
3.1 Організація моделювання у програмному у середовищі Ексель	28
3.2 Моделювання потоків сонячної енергії до фотомодуля	32
3.3 Технічні характеристики фотомодуля	33
3.4 Методика моделювання показників ефективності фотомодуля	36
3.5 Моделювання параметрів енергетичної ефективності фотомодуля	39
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НС	46
4.1 Організаційно-правові заходи	46
4.2 Безпека роботи з сонячними панелями на висоті	46
4.3 Вимоги до комфорту приміщень з тестування фотомодулів	47
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	49
6 ВИСНОВКИ	50
7 ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	51

ВСТУП

Швидкому нарощуванню потужностей фотоелектричної генерації в Україні сприяє унікальний комплекс різноманітних чинників – від загострення екологічних проблем і неясних перспектив освоєння нових родовищ традиційних не відтворюваних енергоресурсів, до жорсткого протистояння світових держав за логістичні маршрути у межах глобалізованого світу. В Україні до них додаються постійні атаки на об'єкти генерації та енергетичної інфраструктури з нерідко тривалими перервами в електропостачанні

Ринок фотоелектрики, пропонує частково компенсувати втрати доступними фотоелектричними установками різної потужності, денної продуктивності та енергетичної конфігурації. Вони доступні для широких верств самодіяльного населення у вигляді автономних джерел енергії, з можливостями паралельної роботи у складі електромереж різного рівня організації. Натомість їх природним недоліком є нестабільність генерації через особливості потоків сонячної енергії протягом дня. Зате вони має дві складові – закономірну, однозначною залежну від поточних небесних координат Сонця і випадкову – через дію різноманітних чинників, в основному погодозалежних.

Методики моделювання показників ефективності фотоелектричних установок протягом дня зазвичай відпрацьовують за експериментально встановленими погодинними і таблично заданими залежностями потоків сонячної радіації та параметрів довкілля, але тільки станом на поточний день року та у межах конкретного інсоляційного майданчика. Такий підхід обмежує можливості використання отриманих результатів на інших локаціях з іншими кліматичними умовами. Натомість зручніше скористатися табличними значеннями усереднених інсоляційних величин, наведених у довідниковій літературі. Їх інтенсивність зручно апроксимувати аналітичними виразами, які допускають розділення закономірних змін інтенсивності протягом дня від її випадкових відхилень. Такі вирази дозволяють операторам ідентифікувати природу відхилень та відтворити проміжні значення інтенсивності усіх потоків.

РОЗДІЛ 1. ЕНЕРГЕТИКА СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ І ПАНЕЛЕЙ

1.1. Актуальність теми кваліфікаційної роботи

На сучасному етапі розвитку сонячної енергетики основну увагу приділять питанню підвищення енергетичної ефективності сонячних панелей і фотоенергетичних систем [1, 2]. Відповідні заходи розробляють на усіх етапах перетворення сонячної енергії – проектування, комплектації та режимів експлуатації фотоелектричних установок. Умови інсоляції протягом дня змінюється, як закономірно так і випадковим чином, у залежності від енергетичної освітленості фотомодуля, температури довкілля та корисного навантаження тощо. Ефективність фотоелектричного перетворення кожної панелі зазвичай оцінюють коефіцієнтом поточною потужністю, годинною чи денною продуктивністю або коефіцієнтом корисної дії η .

На етапі експлуатації енергетичну ефективність фотомодуля традиційно оцінюють за проміжними параметрами його вольт-амперної характеристики (ВАХ) при сталих значення вхідних величин – інтенсивності сонячних променів і температури довкілля. Формальну залежність струму від напруги $I(U)$ називають вольт-амперною характеристикою, потужності від напруги $P(U)$ – вольтватною або навантажувальною. Обидві залежності отримують експериментально за результатами вимірювання відповідних величин. На них виділяють особливі точки: струму короткого замикання $I_{кз}$ або I_{sc} (short circuit), напруги холостого ходу U_{xx} або U_{oc} (відкритого кола – open circuit), точки максимальної потужності P_{mpp} (maximum power point) з координатами на осях струму I_m і напруги U_m .

Основний показник ефективності сонячної панелі – коефіцієнт корисної дії η – розраховують за відношенням генерованої пікової потужності P_{mpp} до інтенсивності вхідного потоку сонячної енергії за очевидними співвідношеннями

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{G_t} = \frac{I_m U_m}{G_t} = FF \frac{I_{кз} U_{xx}}{G_t}, \quad (1.1)$$

де величину FF (Fill Factor) називають коефіцієнтом заповнення ВАХ і розраховують за формулою:

$$FF = \frac{P_{mpp}}{I_{кз} U_{xx}} \quad (1.2)$$

Значення ККД, наведені у паспорті фотомодуля надає виробник за результатами прямого вимірювання пікової потужності при стандартних зовнішніх умовах: освітленні потоком сумарної інтенсивності $G_t = 1000 \text{ Вт/м}^2$ і температурі довкілля $T_a = 25^\circ\text{C}$ (стандарт STS – Standard Test Conditions). Але природні умови роботи сонячних панелей протягом дня постійно змінюються, тому виникає практична потреба у вдосконаленні методик неперервної оцінки ефективності роботи фотопанелей без призупинки процесу генерації.

Натомість теоретичний підхід полягає у визначенні особливих точок ВАХ, за якими методами комп'ютерного моделювання можна з допустимою похибкою відтворити усю криву. Відомі з літератури приклади такого моделювання [3-7] переважно скеровані на відпрацювання відповідних методик з наступним порівнянням їх достовірності з експериментально побудованими ВАХ конкретних майданчиків та днів року. Тоді як практичний підхід вимагає протилежної дії – прогнозування оптимальних режимів роботи фотопанелі виходячи з їх паспортних технічних характеристик, та поточних параметрів довкілля [8]. За розробленими критеріями передбачається вчасно виявляти, наприклад графічним порівнянням, відхилення поточних показників роботи від їх оптимальних значень.

У роботі пропонується поєднати спочатку розраховувати поточні параметри фотомодуля при типових параметрах вхідних величин – усереднених інтенсивності потоків сонячної енергії і температури довкілля наведених у довідниках з метеорології. Їх можна змоделювати для умов інсоляції у наближенні ясного неба Європейського Атласу сонячної радіації (ESRA) [9-10].

Ця модель дозволяє оцінювати ще й інтегральні показники ефективності – погодинну та денну продуктивність фотоелектричних установок. Але у літературі результати моделювання параметрів інсоляції за такою схемою практично відсутні, що стримує розвиток технологій з підвищення ефективності сонячних панелей та фотоелектричних установок.

1.2 Енергетика фотоелектричного перетворення

Пряме перетворення енергії сонячних променів в електричну відбувається в об'ємі ($p-n$) переходу – тонкого шару по обидва боки контакту двох напівпровідників з різними типами провідності та рухливості (рис. 1.1) У напівпровідниках n -типу основними носіями заряду є електрони провідності, а неосновним дірки і навпаки. Концентрація вільних зарядів залежить від кількості та природи домішкових атомів у кристалічній ґратці напівпровідників, рівня енергетичної освітленості перехідної зони, довжини хвилі світла і її температури.

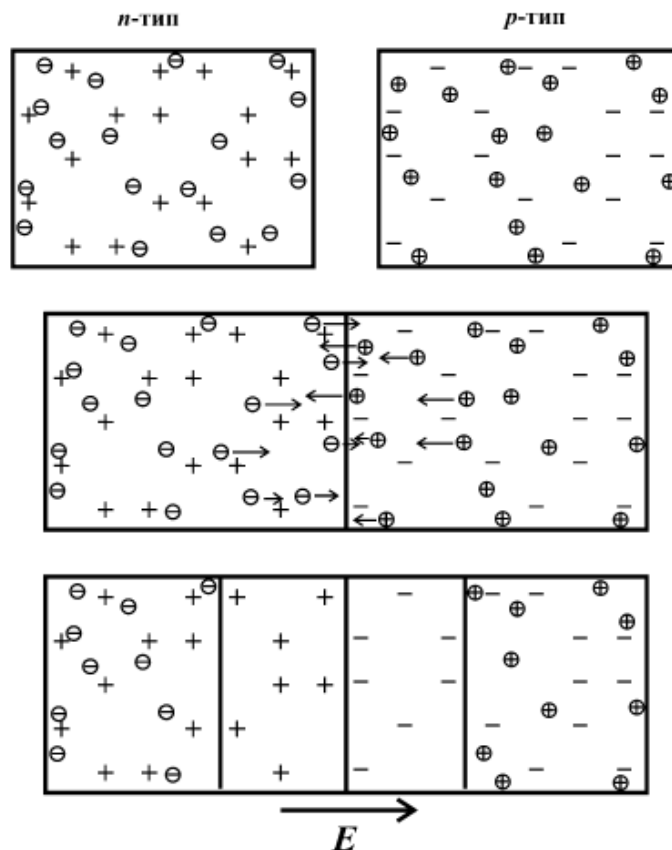


Рисунок 1.1 – Перерозподіл зарядів у зоні контакту двох напівпровідників з

Природному процесу дифузного вирівнювання концентрації вільних зарядів на межі розділу протидіє електричне поле протилежної полярності. Рівноважному стану відповідає електрорушійна сила ($p-n$) переходу, при якій встановлюється динамічна рівновага між прямим та зворотнім дифузійними потоками (рис. 1.2).

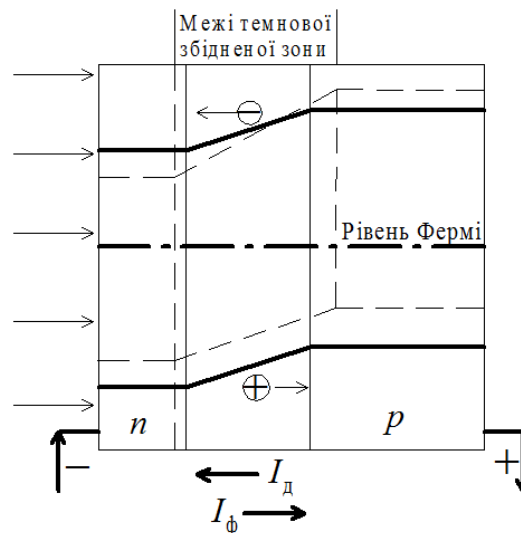


Рисунок 1.2 – Дифузний I_ϕ та дрейфовий I_d потоки зарядів через $p-n$ перехід та його заступна схема (пунктиром обмежено краї енергетичних зон у темноті)

При освітленні $p-n$ переходу концентрація вільних зарядів в об'ємі напівпровідника зростає з відповідним збільшенням потоків: прямого (дифузійного) у вигляді фотоструму I_ϕ фотоелементу та оберненого (дрейфового) в діоді I_d . Зворотний дрейфовий потік неосновних термостимульованих зарядів ще називають темновим струмом і позначають I_0 або I_s . Значення обох струмів залежать від освітленості, температури, провідності напівпровідникового матеріалу (концентрації та їх рухливості в об'ємі напівпровідника). Щоб підкреслити цю особливість, у його заступну схему фотоелемента вноситься діод, який вказує на полярність джерела фотоструму та одночасно є умовно зовнішнім навантаженням фотодіода (рис. 1.3а, б). Утворене електричне коло характеризують не фото електрорушійною силою E_ϕ , а фотонапругою U_ϕ .

Генерований фотострум I_{ϕ} послаблюється зростаючим з температурою зворотнім (темновим) струмом насичення «навантажувального» діоду I_0 . Його визначають експериментально за відсутності зовнішнього освітлення, коли фотонапруга U_{ϕ} рівна напрузі на діоді і відповідає стану розірваного кола $U_{\text{рк}}$ (холостого ходу $U_{\text{хх}}$) $U_{\phi} = U_{\text{рк}} = U_{\text{хх}} = U_D$.

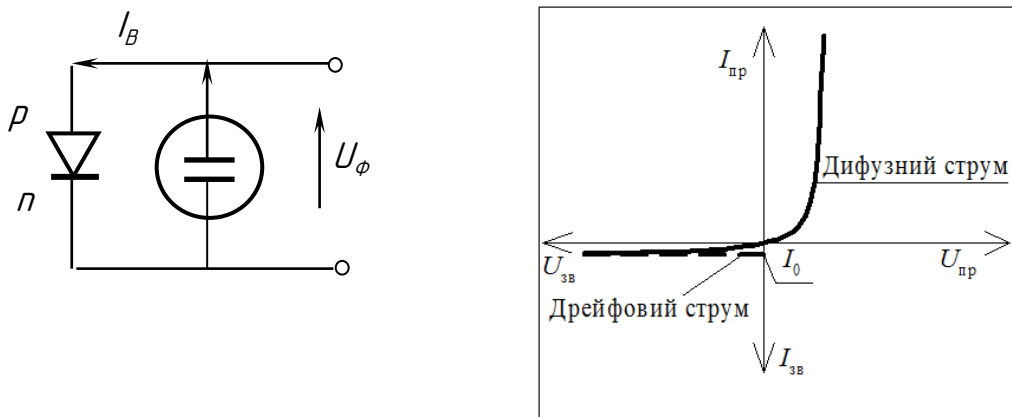


Рисунок 1.3 – заступна схема фотодіода (а) та вольт амперна характеристика діода: I_0 – струм насичення

Значення темнового струму змінюється з температурою за експоненційною залежністю, відомою як формула Шоклі [11]:

$$I_{\text{д}} = I_0 \left[\exp\left(\frac{qU_{\text{хх}}}{AkT}\right) - 1 \right], \quad (1.3)$$

де: $q = 1,602 \times 10^{-19}$ Кл – заряд електрону; $k = 1,3806503 \times 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана.

Множник A називають фактором ідеальності діоду, який враховує різні механізми переміщення носіїв зарядів через p - n перехід: $A=1$, якщо переважає дифузійний процес, а якщо механізм рекомбінації в області виснаження, то $A \approx 2$. У деяких публікаціях для кремнію пропонують прийняти $A = 1,3$.

Натомість просторовий розподіл зарядів та енергетичних потоків всередині контактного напівпровідника має функціональні властивості повного електричного кола, утвореного фотоелементом, як джерелом фотоструму та двома вбудованими резисторами (рис. 1.4). Паралельний (p - n) переходу

шунтовий резистор $R_{ш}$ (англ. photo shunt R_{ph}) відображає ефективний опір поверхневим та об'ємними струмам на елементах конструкції, а послідовний (серієсний) $R_{п}$ (англ. series R_s) – сумарний опір струму зовнішнього навантаження послідовно з'єднаних струмозбиральних контактів, об'ємних опорів кожного p та n елемента, опорів та перехідних опорів метал-напівпровідник.

Співвідношення між ними та енергетичними величинами зазвичай описують рівнянням однодіодної схеми:

$$I = I_{\phi} - I_0 \left(\exp \frac{q(U + IR_{ш})}{AkT} - 1 \right) - \frac{U + IR_{ш}}{R_{ш}} \quad (1.4)$$

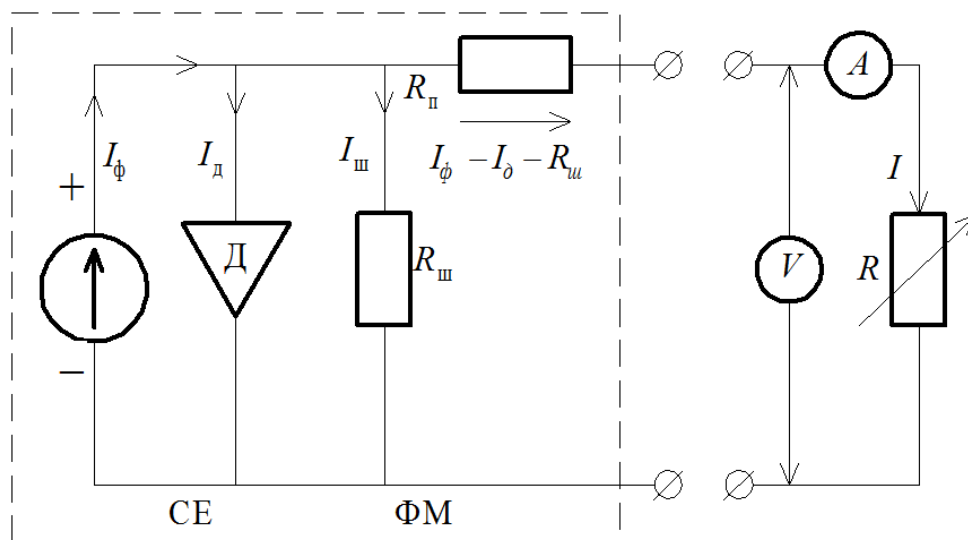


Рисунок 1.4 – Заступна схема сонячного елемента (СЕ) і фотомодуля (ФМ) у складі вольтметра, амперметра і активного навантаження R

Елементи схеми, розміщені всередині виділеного пунктиром прямокутника, однаково відображають структуру та особливості енергетичних перетворень як у сонячному елементі так і сонячній панелі – від входу сонячних променів до зовнішніх клем. Графічно його ілюструють вольт-амперною або $I(U)$ та вольт-ватною $P(U)$ (навантажувальною) характеристиками ВАХ, наведеними на рис. 1.5.

Графіки експериментальних характеристик сонячного елемента чи фотомодуля будують за результатами вимірювання струму та напруги на

клеммах імітатора зовнішнього навантаження R_H у вигляді реостату або потенціометра. В особливих токах кривих безпосередньо вимірюють значення струму короткого замикання $I_{кз}$, напруги холостого ходу U_{xx} (неробочого $U_{нх}$) і значення максимальної потужності (maximum power point) P_{mpp} .

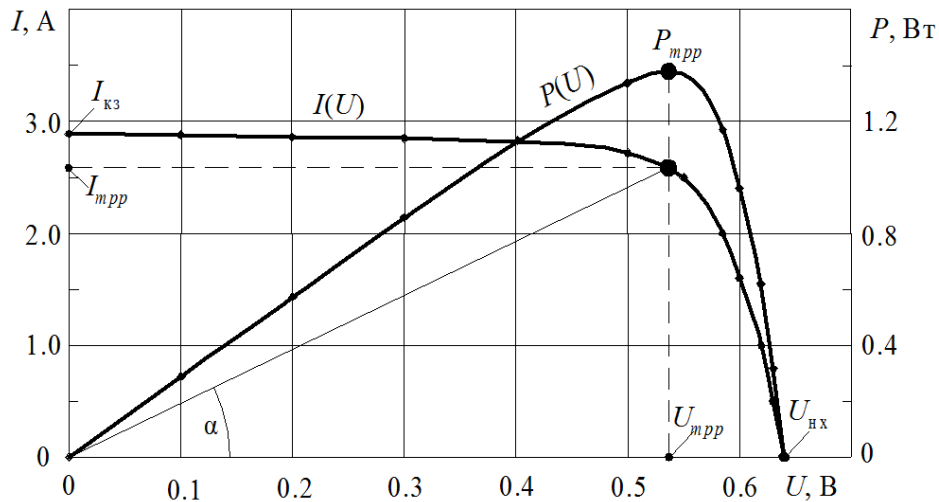


Рисунок 1.5 – Зовнішні характеристики типового монокристалічного кремнієвого сонячного елемента з особливими точками

Максимальній потужності відповідає точка P_{mpp} навантажувальної кривої $P(U)$ з відповідними координатами у точках I_{mpp} та U_{mpp} кривої ВАХ. Двом крайнім позиціям повзунка реостата відповідають режими короткого замикання з максимальним значенням струму, коли $I_{кз} = I_H(max)$ і $U_H = U_H(min) \rightarrow 0$ та режиму холостого (неробочого) ходу з розривом зовнішнього кола, коли $U_{xx} = U_H(max)$ та $I_H = 0$. Обидва режими на рис. 1.5 відповідають крайнім точкам ВАХ $I(U)$ та вольт ватних $P(U)$ характеристик, відкладених на координатних осях.

Поточні значення опору навантаження розраховують за очевидними співвідношенням між струмом і напругою з геометричним змістом котангенса кута нахилу відрізка, проведеного з початку координат до відповідної точки ВАХ

$$R_H = \frac{U_H}{I_H} = \text{ctg}\alpha \quad (1.5)$$

Натомість значення внутрішніх опорів $R_{ш}$ та $R_{п}$ розраховують через відношення приростів ВАХ у її відповідних крайніх точках за такими формулами

$$R_{ш} = \frac{\Delta U_{кз}}{\Delta I_{кз}} \quad (1.6)$$

$$R_{п} = \frac{\Delta U_{нх}}{\Delta I_{нх}} \quad (1.7)$$

За дуже пологого нахилу ділянки ВАХ поблизу точки $I_{кз}$ і навпаки – дуже крутого поблизу точки $U_{хх}$ (рис. 1.5), прирости обох величин, як і результати їх оцінки графічним методом, визначають з великими похибками. Тому їх часто визначають за параметрами експериментально побудованої темної ВАХ [11]. Графіки навантажувальних характеристик сонячних елементів і панелей зазвичай приводять у технічній документації виробів за результатами заводських випробувань при сталому рівні освітленості, спектрального складу і температури сонячних елементів. Але на практиці часто обмежуються прямим вимірюванням значень ВАХ в особливих точках, з наступним розрахунком проміжних значень у вигляді розв'язків трансцендентного рівняння (1.4) з невідомими двома параметрами – струмом насичення I_0 та наближено визначеним фактором ідеальності діоду $1 \leq A \leq 3$.

У загальному випадку зв'язок ефективності ФЕП з світловими характеристиками фотодіодів у неявному вигляді описується світловою ВАХ фотоелектричного перетворювача (1.4), яке не має однозначного аналітичного розв'язку [12-14]. Але у літературі наведено ряд прикладів методик наближеного розрахунку та чисельного моделювання відповідних розв'язків, для експериментально невизначуваних величин I_0 , $R_{п}$ і $R_{ш}$. Наприклад струм насичення I_0 пропонується розраховувати через безпосередньо виміряні величини за такими формулами:

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\gamma} - \frac{U_{sc}}{\gamma R_p}; \quad (1.8)$$

$$\gamma = \exp \frac{U_{oc}}{V_t} = \exp \frac{qU_{oc}}{AkT} \quad (1.9)$$

Протягом дня максимум корисної потужності фотомодуля змінюється як через нестабільні природні потоки сонячної енергії так і енергетичні процеси всередині сонячних елементів. Основними чинниками нестабільності вважають коливання температури зони ($p-n$) переходу, залежної від стану довкілля, режимів освітлення, сонячного спектру і умов охолодження корпусу конвективним потоком зовнішнього повітря (вітровим потоком) та радіаційним механізмом обміну енергією з верхніми холодними шарами атмосфери.

1.3 Структура та енергетичні параметри сонячних панелей

Сонячні панелі (фотоелектричні модулі) M зазвичай складається з 36 або 72 послідовно та/або паралельно (рис. сполучених сонячних елементів, N_p та N_w відповідно або N_s та N_p в англомовній літературі. При їх послідовному сполученні вихідний струм I_M і напруга U_M модуля пов'язані з решту параметрами такими ж співвідношеннями, як і сонячні елементи:

$$I_n = I_\phi - I_0 \left(\exp \frac{q(U_M + I_M N_p R_{ш})}{N_p A k T} - 1 \right) - \frac{U_M + I_M N_p R_{ш}}{N_p R_{ш}} \quad (1.8)$$

Але тут усі решту параметрів уже мають той же фізичний зміст, що у сонячних елюентах, але як сумарно ефективні величини.

Якщо фотоелектрична система (матриця) складена з N_M однакових модулів, а у кожному з них по N_s сполучених послідовно сонячних елементів, то їх загальне число

$$N = N_M \times N_p \quad (1.9)$$

У змішаному послідовному N_s та паралельному N_p сполученні фотомодулів загальний вихідний струм I_A та напруга U_A фотоелектричної матриці разом з елементами, пов'язані між собою таким рівнянням, аналогічним виразу (1.4) для сонячного елемента

$$I_A = N_{\text{ш}} I_{\phi} - N_{\text{п}} I_0 \left(\exp \frac{q \left(V_A + I_A \frac{N_{\text{п}}}{N_{\text{ш}}} R_{\text{п}} \right)}{N_{\text{п}} A k T} - 1 \right) - \frac{V_A + I_A \frac{N_{\text{п}}}{N_{\text{ш}}} R_{\text{п}}}{\frac{N_{\text{п}}}{N_{\text{ш}}} R_{\text{ш}}} \quad (1.10)$$

І на кінець, з новими позначеннями $N_{\text{п}} I_{\phi} \equiv I'_{\phi}$, $N_{\text{п}} I_0 \equiv I'_0$, $(N_{\text{с}}/N_{\text{п}}) R_{\text{с}} \equiv R'_s$ і $(N_{\text{с}}/N_{\text{п}}) R_{\text{р}} \equiv R'_p$, співвідношення між відповідним параметрами як сонячного елемента так і фотомодуля можна подати однакоим узагальненим виразом

$$I_A = I'_{\phi} - I'_0 \left(\exp \frac{q(V_A + I_A R'_{\text{п}})}{N_{\text{п}} A k T} - 1 \right) - \frac{V_A + I_A R'_{\text{п}}}{R'_{\text{ш}}}, \quad (1.11)$$

Саме тому заступна електрична схема (електрична модель) однакова для сонячного елемента, окремого фотомодуля та багато модульної збірки (матриці). З використанням програм моделювання електромагнітних перехідних процесів, таких як EMTDC/PSCAD і MATLAB/SIMULINK, можна безпосередньо отримати усі розв'язки співвідношення (5) [4].

Але громізка процедура експериментального визначення вхідних параметрів та їх введення у програми чисельного моделювання решту величин обмежує їх практичне використання для неперервного контролю за відхиленнями режимів роботи фотоенергетичних установок від оптимальних показників протягом дня. Але критерії оцінки визначають порівнянням вихідної потужності фотомодуля з поточними значеннями інтенсивності вхідних потоків сонячної радіації і температури довкілля протягом дня. Відтак їх прогнозування або безпосереднє вимірювання у режимі реального часу з наступною автоматичною обробкою і виданням результатів порівняння, недоступне для більшості експлуатаційників. Альтернативний підхід пропонується у попередньому моделюванні режимів інсоляції та параметрів довкілля за їх ще не стандартизованими станами ідеалізованими значеннями, які близькі до їх усереднених метеорологічних величинами.

РОЗДІЛ 2. ТИПОВІ РЕЖИМИ ІНСОЛЯЦІЇ ТА РОБОТИ ФЕУ

2.1 Стандарти тестування сонячних панелей

Ефективність фотоелектричного перетворення у технічній документації на сонячні елементи і панелі традиційно оцінюють через коефіцієнт корисної дії при строго обумовлених (стандартних) умовах інсоляції. Згідно стандарту STS (Standard Test Conditions) виробники регламентують цей показник за освітлення променями спектрального складу AM-1,5 і температури сонячних елементів або фотопанелі 25°C при нульовій швидкості вітру. Тоді як реальні умови їх експлуатації протягом дня у складі діючих фотоенергетичних установок значно різноманітніші, що вимагає постійного переоцінювання робочих режимів з метою оптимізації їх поточної потужності та денної продуктивності. Відтак виробники фотомодулів зазвичай сертифікують свої вироби тестуванням за методиками, відповідними майбутнім умовам їх експлуатації. А отримані за результатами заводських випробувань технічні характеристики кожного виробу “Solar module datasheet”, відображають у його паспортній документації [8]. Для оцінки ефективності сонячних панелей за природних умов їх експлуатації було введено поняття номінальної температури, яка відповідає типовим умовам роботи панелі.

Ближчими до типових умов експлуатації сонячних елементів і панелей відповідають режими їх випробування, регламентовані двома стандартами: NOCT (Nominal Operating Cell Temperature), і NMOT (Nominal Module Operating Temperature) відповідно. Обидва регламентують однакові рівні освітленості у 800 Вт/м² променями спектрального складу AM-1,5, температури довкілля 20 °C та швидкості вітру 1 м/с на метеорологічній висоті 10 м. Результати тестування у таких умовах, реєструють у технічній документації виробів як паспортна характеристика NOCT чи NMOT стандартів.

Перегрів сонячної панелі не тільки на 15 градусів над температурою навколишнього повітря відчутно змінює продуктивність сонячної електростанції які нерідко нагріваються вище за 45°. Тому вимірювання

параметрів NOCT проводять при відкритій задній поверхні сонячної панелі для безперешкодного охолодження її навколишнім повітрям. Відтак вибір конструкційних рішень, відповідних їм матеріалів та зовнішнього оточення підбирають за умові мінімізації нагрівання фотопанелей. Наприклад сонячні панелі переважно встановлюють паралельно покрівлі для їх охолодження конвективними потоками повітря. Однак навіть при цьому звичайного сонячного літнього дня температура панелі може підніматися до 70°C . Для специфічних умов експлуатації введено ще кілька стандартів: PTC (PV-USA Test Conditions), LIC (Low Irradiance Conditions), HTC (High Temperature Conditions) та LTC (Low Temperature Conditions).

2.2 Зміна параметрів ВАХ сонячних панелей у реальних умовах

Змінам робочих характеристик сонячних панелей протягом дня відповідають чутливим параметрам їх вольамперних (IU) та вольтватних (IP) характеристик: струмам короткого замикання I_{sc} , напругам розімкненого кола U_{oc} та максимальній потужності P_{mpp} з координатами у токах I_m та U_m , а (див. рис. 1.5 і 2.1).

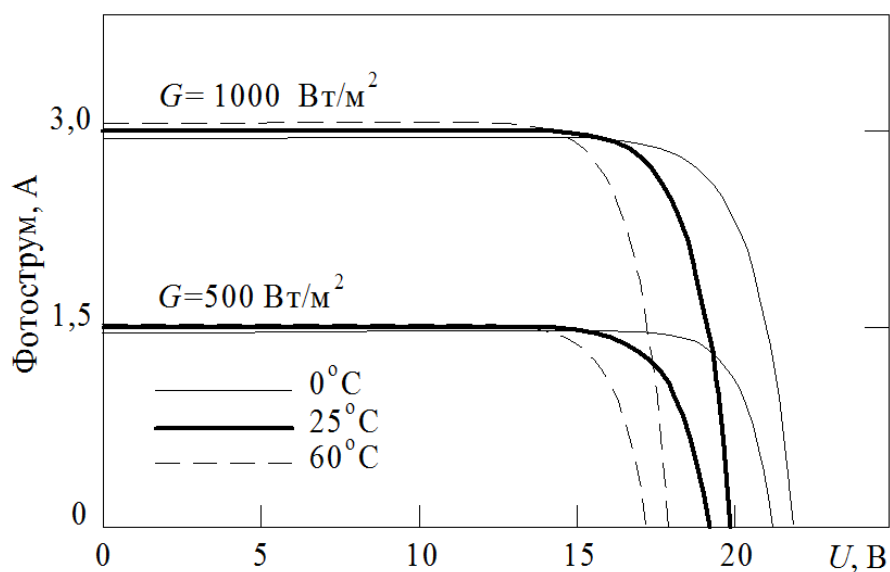


Рисунок 2.1 – Типові зміни ВАХ фотомодуля з освітленістю і температурою

Значення струму короткого замикання зазвичай вважають незалежним від температури та пропорційним енергетичній освітленості поверхні. Натомість напругу розімкненого кола навпаки – незалежною від світлового потоку і пропорційною зміні температури сонячних елементів. У технічній документації фотоелектричних панелей (модулів), також наводять температурні коефіцієнти зміни цих параметрів, які вважають сталими та чисельно рівними їх похідним по температурі у відповідних точках ВАХ:

$$\alpha = \frac{dI_{кз}}{dT} = \frac{\Delta I_{кз}}{\Delta T} = const \quad (2.1)$$

$$\beta = \frac{dU_{нх}}{dT} = \frac{\Delta U_{нх}}{\Delta T} = const \quad (2.2)$$

$$\gamma = \frac{dP}{dT} = \frac{\Delta P}{\Delta T} = const \quad (2.3)$$

При оцінюванні енергетичної ефективності фотопанелей зазвичай приймають, що її максимальна потужність P_{mpp} реалізується за емпірично обґрунтованого наближеного та співвідношення напруг $U_{mpp} \approx 0,75U_{нх}$ [15]. Натомість залишається сталим коефіцієнт форми (заповнення вольт амперної характеристики) FF чисельно рівний відношенню максимальної потужності фотомодуля з координатами I_{mpp} U_{mpp} до площі прямокутника з сторонами рівними струму короткого $I_{кз}$ $U_{нх}$

$$FF = \frac{P_{mpp}}{I_{кз} U_{нх}} \quad (2.4)$$

За цим параметром розраховують поточну вихідну потужність фотомодуля

$$P_{mpp} = I_{mpp} U_{mpp} = FF \times I_{кз} U_{нх}, \quad (2.5)$$

а також показник ефективності фотоелектричного перетворення коефіцієнт корисної дії фотопанелі

$$\eta = \frac{P_{max}}{G_t} = \frac{FF \times I_{кз} U_{нх}}{G_t} \quad (2.6)$$

Три параметри ВАХ з наведених вище співвідношень – I_{sc} , U_{oc} та P_{mpp} – нескладно виміряти безпосередньо на працюючій електроустановці або

розрахувати за наведеними виробником технічними характеристиками фотомодулів. А за співвідношеннями між ними вдається оцінювати показники ефективності фотомодуля протягом усього дня, прогнозувати його поточну потужність годинну і денну продуктивність, а також оперативно виявляти їх відхилення від оптимальних значень. Але наведені у літературі приклади моделювання, як правило відповідають тільки унікальним умовам природної інсоляції та стану довкілля конкретного майданчика. Відтак їх складно порівнювати з результатами інших незалежних досліджень без виділення закономірних складових зміни вхідних величин протягом дня [16, 17].

Для результати безпосередніх вимірювань інтенсивності сонячних променів пропонується замінити їх усередненими середньомісячним значеннями при ясному небі, наведеними у доступних базах метеоданих. Останні неважко виправити від випадкових відхилень попереднім моделюванням їх закономірних погодинних змін у рамках наближення ясного неба з використанням співвідношень Європейського Атласу сонячної радіації (ESRA). Відповідні обґрунтування детально розглянуті у публікаціях [9,10].

2.3 Модель прямого потоку сонячної радіації протягом дня у наближенні ясного неба

Поточну освітленість та енергетичну експозицію поверхні теоретично оцінюють за параметрами модельованого потоку сонячної енергії, інтенсивність якого розраховують відносно сонячної сталої, але з використанням наближених емпіричних оцінок коефіцієнта прозорості атмосфери. Відповідно запропонована там апроксимаційна формула, обрана за ознаками якісного погодження з статистично усередненими даними реєстрації, насправді відображає тільки особливості інсоляції обмеженого регіону.

Порівняння ефективності інсталяцій у різних регіонах і кліматичних зонах необхідно проводити за умови освітлення прямим потоком сонячної енергії, залежним тільки від висоти Сонця над горизонтом. Такий, незалежний від випадкових факторів, ідеалізований потік реалізується тільки за особливо

прозорої (ідеальної) атмосфери без водяної пари та аерозолів, яка у природі реалізується вкрай рідко. Її прозорість з високою точністю оцінюється за фундаментальними співвідношеннями і виражається через ефективну оптичну товщину. Відносно неї прийнято оцінювати і прозорість реальної атмосфери і з високою точністю розраховувати інтенсивність потоку сонячної енергії для будь-якої години дня чи висоти Сонця над горизонтом незалежно від географічних координат місцевості. Таким чином, відомі метеорологічні наближення і співвідношення доцільно прийняти для порівняння ефективності роботи сонячних панелей протягом дня.

Як відомо, на вході в атмосферу середня інтенсивність потоку сонячної енергії (сонячна стала) $G_{sc} = 1367 \text{ Вт/м}^2$ протягом року змінюється пропорційно поточному радіусу земної орбіти. Станом на день року з порядковим номером n її поточне значення G_{sn} розраховують за відомою формулою:

$$G_{sn} = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (2.7)$$

Режими освітлення земної поверхні насамперед додатково змінюються пропорційно сонячному схиленню значенням сонячного схилення δ , яке розраховують за апроксимаційною формулою Купера

$$\delta = \delta_0 \sin \frac{284 + n}{365} 360, \text{ град.} \quad (2.8)$$

Природною точкою відліку часу зручно вважати момент найвищої кульмінації Сонця, який називають справжнім полуднем або локальним (англ.: Local Solar Time, LST). і позначають грецькою буквою τ . Момент сонячного полудня за поясним часом станом на поточний день року розраховують за формулою рівняння часу

$$E = 229,18(0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B - 0,014615 \cos 2B - 0,04089 \sin 2B), \quad (2.9)$$

де $B = (n-1)360/365$ у градусах або $B = (n-1) \cdot 2\pi/365$ у радіанах.

За локальним сонячним часом τ обчислюють поточний кут освітлення горизонтальної поверхні, рівний куту відхилення Сонця від зеніту θ_z за формулою

$$\cos\theta_z = \sin\delta \cdot \sin\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega\tau, \quad (2.10)$$

де φ – географічна широта майданчика, $\omega = 15$ град/год – кутова швидкість обертання земної кулі навколо власної осі.

Просторово-часові режими інсоляції наземних об'єктів визначаються величинами, які характеризують орієнтацію освітленої поверхні відносно Сонця, горизонтально земної поверхні та сторін світу. Зокрема кут освітлення поверхні фотопанелі південної орієнтації з кутом нахилу β до площини горизонту розраховують за формулою

$$\cos\theta = \cos\theta_z \cos\beta + \sin\theta_z \sin\beta \cos\gamma_s, \quad (2.11)$$

де γ_s – кут відхилення Сонця від південного напрямку.

Інтенсивність прямих сонячних променів біля земної поверхні зменшується пропорційно абсолютній масі повітря M вздовж траєкторії земною атмосферою. Чисельно її оцінюють оптичною масою m (інше позначення АМ) відносно вертикального напрямку з мінімальним послабленням сонячних променів за формулою стандартної атмосфери. Наприклад, у Європейському Атласі сонячної радіації використовують модифіковану формулу Кастена-Йонга:

$$m = \frac{\exp\left(-\frac{z}{8334,5}\right)}{\cos\theta_z + 0,50572 \times (96,07995 - \theta_z)^{-1,6354}}, \quad (2.12)$$

де: z – висота над рівнем моря у метрах; число 8334,5 відповідає висоті, на якій атмосферний тиск зменшується в $e = 2,7193$ раз.

Ступінь послаблення сонячних променів земною атмосферою прийнято характеризувати її оптичною густиною $\delta(m)$, залежною від просвіченої маси m . А оптична товщина повітря вздовж траєкторії променя рівна добутку $m\delta(m)$.

Останній варіант виразу для оптичної густини, прийнятий Європейським Атласом сонячної радіації (European Solar Radiation Atlas – ESRA) записують двочленною формулою для уточнення $\delta_R(m)$ при великих значеннях атмосферної маси:

$$1/\delta_R(m) = 6,6296 + 1,7513m - 0,1202m^2 + 0,0065m^3 - 0,00013m^4 \quad (2.13, a)$$

при $m < 20$ і $h > 1,9^\circ$;

$$1/\delta_R(m) = 10,4 + 0,718m \quad (2.13, б)$$

при $m > 20,7$; ($h < 1,9^\circ$; $\theta_z > 87,1^\circ$).

Де Відтак при ясному небі інтенсивність прямих сонячних променів на рівні поверхні ґрунту розраховують за формулою Європейського Атласу сонячної радіації (ESRA) за такою формулою:

$$G_b = G_{sn} e^{-0,8662 \cdot m \cdot \delta_R(m) \cdot T_{LK}(AM2)}, \quad (2.14)$$

де $\delta_R(m)$ – оптична густина особливо чистої (Релеївської) атмосфери без водяного конденсату та аерозолей, а експоненційний множник T_{LK} – фактор Лінке-Кастена – показує, у скільки разів ефективна оптична товщина атмосфери більша за релеївську. У цій формулі інтенсивність сонячних променів протягом дня узалежнена від години дня опосередковано, через проміжні величини – відносну оптичну масу та густину атмосфери m і поточний зенітний кут θ_z .

Наведені на рисунку 2.2 результати моделювання поточної інтенсивності прямих сонячних променів задовільно відтворюють їх реальні погодинні залежності, отримані усередненням багаторічних термінових спостережень. Невеликі відхилення від симетричності зумовлені випадковими факторами впливу на прозорість атмосфери та довільністю актинометричних критеріїв віднесення результатів вимірювань умовам ясного неба [17,18].

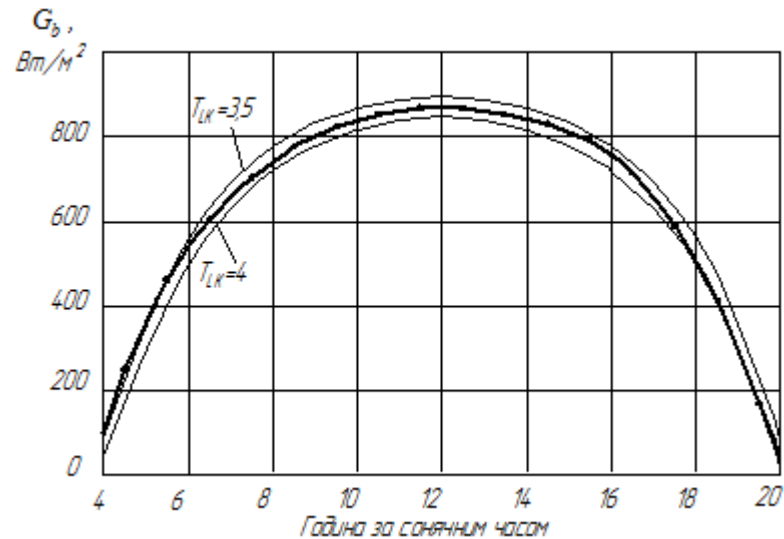


Рисунок 2.2 – Кореляція інтенсивності природного потоку на метеостанції «Бориспіль» (потовщена лінія) і модельованого при двох значеннях каламутності атмосфери (тонкі лінії)

Тому енергетичну ефективність сонячних панелей доцільніше порівнювати за результатами інсоляції при мінімальному показнику каламутності атмосфери $T_{LK} = 2$ з мінімальним спотворенням первинного потоку сонячної енергії.

2.4 Інтегральні показники ефективності сонячної панелі

Інтегральною характеристикою інсоляції є кількість променистої енергії, яка надійшла до сприймаючої поверхні за одиницю часу. У системі СІ для оптичних енергетичних величин її прийнято називати енергетичною експозицією, позначати англійською літерою H і вимірювати у Дж, Вт·год або кратних їм одиницях. У вітчизняній літературі з метеорології цю величину називають сумою сонячної радіації, в англійській літературі вживають терміни «radiation», «irradiation», «radiant exposure», а процес опромінення – «insolation».

Зважаючи на особливості надходження й використання сонячної енергії, її кількість зручно обліковувати протягом години, дня, місяця і року. Причому у сонячній енергетиці [18] навіть використовують спеціальні позначення

енергетичної експозиції: годинної I , денної H та середньоденної (усередненої за місяць) \bar{H} , які пов'язані між собою та густиною (інтенсивністю) потоку $G(\tau)$ і такими співвідношеннями:

$$I = \int_0^1 G(\tau) d\tau = \overline{G(\tau)} \cdot 1 \text{ год}; \quad H = \sum_1^{\tau_c} I_{\tau}; \quad \bar{H} = \frac{1}{N} \sum_1^N H_N, \quad (2.15)$$

де τ_c – тривалість світлового дня, год;

N – число днів у місяці.

Денні та місячні суми радіації, усереднені протягом тривалого періоду реєстрації, наведені в довідковій літературі з поміткою «за результатами реєстрації». За оцінками, вони відрізняються від даних за результатами термінових спостережень і неперервної реєстрації інтеграторами, влітку на $\pm(1 \dots 3 \%)$, а взимку – на $\pm(1 \dots 6 \%)$. Як правило, у базах даних наводять ще й експериментальні значення денних, місячних та річних сум радіації у Вт·год/м² – енергетичних експозицій опромінюваної поверхні площею в 1 м² протягом 1 години. Вони чисельно рівні середній інтенсивності потоку у Вт/м² за той самий часовий інтервал, а з врахуванням кута освітлення, ще й енергетичній освітленості.

При моделюванні інтегральних показників ефективності сонячних установок локального майданчика протягом години, дня, місяця або року та денної продуктивності – використовують середньомісячні значеннями інтенсивності потоків сонячної енергії. Воно значно достовірніше за результати одноразових безпосередніх вимірювань або прийнятих у метеорології термінових щотригодинних.

Сонячні панелі переважно орієнтують на південь (кут їх азимутального відхилення $\gamma=0$) і нахиляють під оптимальним кутом β до площини горизонту. Тому моменти початку τ_{cx} і завершення τ_{zx} їх освітлення прямими сонячними променями рівні за величиною і протилежні за знаком, тривалість інсоляції завжди коротша тривалості сонячного саява. При цьому зміни її інтенсивності протягом дня симетричні відносно полудня. На противагу поверхні довільної

орієнтації з нерівним нулю кутом азимутального відхилення ($\gamma \neq 0$), для яких тривалість інсоляції до і після полудня неоднакова $|\tau_{cx}(\beta, \gamma)| \neq |\tau_{zx}(\beta, \gamma)|$.

У загальному випадку поверхні довільної орієнтації, енергетична експозиція її поверхні чисельно рівна площі під кривою відповідної часової залежності $G(\tau)$, розділеної n ординатами на $(n-1)$ елементарних трапецій [18]. Якщо відлік часових інтервалів починається від сонячного полудня, то моменти початку і закінчення її інсоляції переважно асиметричні і не збігаються з часовими відмітками рівномірної дискретизації кривої $G(\tau)$ (див. рис. 2.3). Відповідно дві крайні трапеції вироджуються у трикутники, а вираз для суми усіх площ, можна записати у такому вигляді:

$$H = \frac{G_1 + G_2}{2} \Delta\tau_1 + \frac{G_2 + G_3}{2} \Delta\tau_2 + \dots + \frac{G_{n-2} + G_{n-1}}{2} \Delta\tau_{n-2} + \frac{G_{n-1} + G_n}{2} \Delta\tau_{n-1}, \quad (2.16)$$

де $G_1 \equiv G_{cx}$ і $G_n \equiv G_{zx}$.

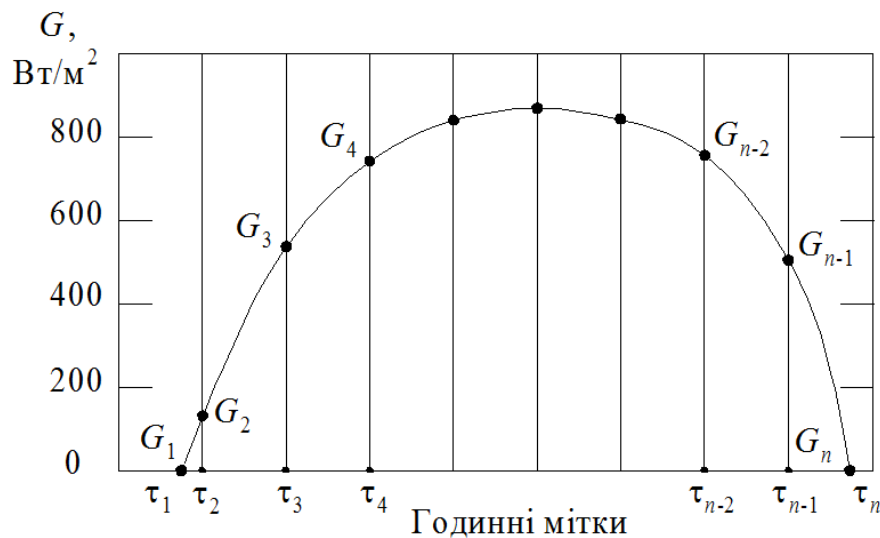


Рисунок 2.3 – Оцінка денної експозиції як сумарної площі під кривою

Крайні кроки дискретизації $\Delta\tau_1$ і $\Delta\tau_{n-1}$ переважно нерівні між собою, а внутрішні $\Delta\tau$ рівні, тому їх надалі позначено без індекса. Ширина крайнього інтервалу рівна різниці між моментами сходу/заходу Сонця над/під поверхнею фотомодуля і першою/останньою відмітками ділянки рівноінтервальної дискретизації:

$$|\Delta\tau_1| = \tau_2 - \tau_{cx}; \quad |\Delta\tau_{n-1}| = \tau_{zx} - \tau_{n-1}. \quad (2.17)$$

З їх врахуванням і після елементарних перетворень, формулу (2.15) можна узагальнити до такого вигляду:

$$H = \frac{G_1 + G_2}{2} \Delta\tau_1 + \frac{G_{n-1} + G_n}{2} \Delta\tau_{n-1} + \left(\frac{G_2 + G_{n-1}}{2} + G_3 + G_4 + \dots + G_{n-3} + G_{n-2} \right) \Delta\tau \quad (2.18)$$

У частинному випадку симетричної кривої $G(\tau)$ ширина крайніх часових інтервалів однакова $\Delta\tau_1 = \Delta\tau_{n-1}$, тому перші два доданки об'єднують в один:

$$H = 0,5(G_1 + G_2 + G_{n-1} + G_n) \Delta\tau_1 + \left(\frac{G_2 + G_{n-1}}{2} + G_3 + G_4 + \dots + G_{n-3} + G_{n-2} \right) \Delta\tau. \quad (2.19)$$

За наведеними формулами складають комп'ютерні програми для розрахунку енергетичних експозицій фотомодуля та кривих зростання (динаміки накопичення) генерованої енергії протягом дня.

До інтегральних показників ефективності роботи фотоелектричних модулів також відносять коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) та динаміку зростання продуктивності протягом дня. Коефіцієнт корисної дії фотоенергетиці доцільно поділяти на поточний, та ефективний – усереднений протягом години, дня, місяця чи року. Натомість поняття динаміки зростання продуктивності протягом дня у практичній літературі з фотоенергетики не використовують. Особливості їх розрахунку обох цих величини будуть розглянуті у наступному розділі роботи.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ ПРОТЯГОМ ДНЯ

3.1 Організація моделювання у програмному у середовищі ЕКСЕЛЬ

Вибір середовища Ексель для моделювання фотоелектричних перетворень протягом дня, обумовлений табличним представленням усіх, залежних від години дня вхідних інсоляційних величин. У сонячній енергетиці режими інсоляції характеризують не рідше, як погодинними значеннями інтенсивності сонячних променів, встановлених експериментально або розрахованими за апроксимаційними формулами. Їх кількість протягом найдовшого літнього дня на широті 50° складає 18, разом з крайніми для моментів сходу і заходу Сонця. Тоді як для розрахунку показників ефективності фотомодуля потрібно задавати ще й розподіл усіх проміжних величин – параметрів відповідних формул ланцюжка перетворень сонячної енергії у фотоелектрику.

Таким чином процес моделювання починається з організації масиву поточних значень вхідних та проміжних величин, розміщених у певній послідовно їх отримання або обчислення. Для цього найпростіше скористатися програмним середовищем Ексель, доступним для широкого кола користувачів з елементарними навичками програмування математичних формул та операцій вводу даних і представлення результатів обчислень. Відтак доцільно скористатися форматом таблиці Ексель, наведеним у монографії [] для моделювання інсоляції нахиленої поверхні південної орієнтації. Її скриншот відтворений на рис. 3.1.

Таблиця відповідає просторово-часовим умовам інсоляції фотомодуля, нахиленого під кутом 45° до горизонту на широті 50° і станом на умовну середину липня, коли денна експозиція рівна середньомісячній. У перших трьох колонках *A*, *B* і *C* до 17 рядка включно, наведені загально відомі значення сталих величин, вхідних просторово-часових параметрів інсоляції.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Вхідні величини			Часові відмітки			$\cos\theta_z$	θ_z	$\sin\theta_z$	$\cos\gamma_s$	γ_s	$\sin\gamma_s$	h
2	Назва	Символ	Значення	т, год	t, год	год. хв	б/р	град	б/р	б/р	град	б/р	
3	Основні вхідні величини			-7,85	5,45	5:27	7E-05	90	1	-0,5662	-124	-0,8243	0,004
4	Сонячна стала	G_{sc} , Вт/м ²	1367	-7,5	5,80	5:48	0,0497	87,15	0,9988	-0,5076	-121	-0,8616	2,85
5	Швидкість обертання Землі	ω , град/год	15	-7	6,3	6:18	0,1239	82,88	0,9923	-0,4219	-115	-0,9066	7,116
6	Широта	ϕ , град	50	-6,5	6,80	6:48	0,2007	78,42	0,9797	-0,3339	-110	-0,9426	11,58
7	--	ϕ , рад	0,87266	-6	7,3	7:18	0,2788	73,81	0,9603	-0,2436	-104	-0,9699	16,19
8	Довгота	ψ , град	24	-5,5	7,80	7:48	0,357	69,09	0,9341	-0,1508	-98,7	-0,9886	20,91
9	Меридіан годинного поясу	ψ_2 , град	30	-5	8,3	8:18	0,4338	64,29	0,901	-0,0547	-93,1	-0,9985	25,71
10	Висота над рівнем моря	z , м	269	-4,5	8,80	8:48	0,5079	59,47	0,8614	0,0454	-87,4	-0,999	30,53
11	Стан атмосфери (фактор Лінке)	T_{LK}	4	-4	9,3	9:18	0,5782	54,68	0,8159	0,1505	-81,3	-0,9886	35,32
12				-3,5	9,80	9:48	0,6433	49,96	0,7656	0,2617	-74,8	-0,9651	40,04
13	Переходи град→рад→град	π	3,14159	-3	10,3	10:18	0,7022	45,4	0,712	0,38	-67,7	-0,925	44,6
14		2π	6,28319	-2,5	10,80	10:48	0,7538	41,08	0,6571	0,5054	-59,6	-0,8629	48,92
15		$\pi/2$	1,5708	-2	11,3	11:18	0,7973	37,13	0,6036	0,6361	-50,5	-0,7716	52,87
16		$\pi/180$	0,01745	-1,5	11,80	11:48	0,832	33,7	0,5548	0,7664	-40	-0,6424	56,3
17		$180/\pi$	57,2958	-1	12,3	12:18	0,8571	31	0,5151	0,8837	-27,9	-0,468	59
18				-0,5	12,80	12:48	0,8724	29,26	0,4888	0,9686	-14,4	-0,2487	60,74
19	Полудень			0	13,3	13:18	0,8775	28,65	0,4795	1	1E-06	3E-08	61,35
22	Сонячне схилення	δ , град	21,3456	1,5	14,80	14:48	0,832	33,7	0,5548	0,7664	39,97	0,6424	56,3
23	--	δ , рад	0,37255	2	15,3	15:18	0,7973	37,13	0,6036	0,6361	50,5	0,7716	52,87
24	Поправка рівняння часу	E , хв	-6,00869	2,5	15,80	15:48	0,7538	41,08	0,6571	0,5054	59,64	0,8629	48,92
25	Зміщення моменту полудня	Δt , хв	17,9913	3	16,3	16:18	0,7022	45,4	0,712	0,38	67,67	0,925	44,6
26	--	Δt , год	0,29986	3,5	16,80	16:48	0,6433	49,96	0,7656	0,2617	74,83	0,9651	40,04
27	Полудень поясний	t , год	13,2999	4	17,3	17:18	0,5782	54,68	0,8159	0,1505	81,35	0,9886	35,32
28	--	t , год.хв	13:18	4,5	17,80	17:48	0,5079	59,47	0,8614	0,0454	87,4	0,999	30,53
29				5	18,3	18:18	0,4338	64,29	0,901	-0,0547	93,14	0,9985	25,71
30	Горизонтальна поверхня			5,5	18,80	18:48	0,357	69,09	0,9341	-0,1508	98,67	0,9886	20,91
31	Азимут сходу Сонця	$A_{сх}$, град	-124,491	6	19,3	19:18	0,2788	73,81	0,9603	-0,2436	104,1	0,9699	16,19
32	--	радіан	-2,17277	6,5	19,80	19:48	0,2007	78,42	0,9797	-0,3339	109,5	0,9426	11,58
33	Азимут заходу Сонця	$A_{зх}$, град	124,491	7	20,3	20:18	0,1239	82,88	0,9923	-0,4219	115	0,9066	7,116
34	--	радіан	2,17277	7,5	20,80	20:48	0,0497	87,15	0,9988	-0,5076	120,5	0,8616	2,85
35	Момент сходу Сонця	$t_{сх}$, год	7,85053	7,85	21,15	21:09	7E-05	90	1	-0,5662	124,5	0,8243	0,004
36	- за поясним часом	$t_{сх}$, год	5,44932	-6,1306		$t_{сх}(B)$	0,2584	75,03	0,966	-0,2674	-124	-0,8243	14,97
37	--	год.хв	5:27	6,13062		$t_{сх}(B)$	0,2584	75,03	0,966	-0,2674	124,5	0,8243	14,97
38	Момент заходу Сонця	$t_{зх}$, год	-7,85053										
39	- за поясним часом	$t_{зх}$, год	20,8505										
40	--	год.хв	20:51										
41	Момент переходу через $\gamma_s=90^\circ$	t_{NS} , год	4,72383										
42	- за поясним часом	t_{NS} , год	8,57603										
43	--	год.хв	8:35										
44	Момент переходу через $\gamma_s=-90^\circ$	t_{SN} , год	-4,72383										
45	- за поясним часом	t_{SN} , год	18,0237										
46	--	год.хв	18:01										
47	Кут нахилу поверхні	β , град	45										
48	--	радіан	0,7854										
49	Азимут поверхні	γ , град	0										
50	--	радіан	0										

Рисунок 3.1 – Фрагмент таблиці Ексель, заповненої значеннями сталих, умовно сталих та проміжних величин

Тоді як у наступних нижчих комірках колонки **C** з 20-го до 28-го рядка заповнені розрахованими значеннями умовно сталих – протягом одного дня – величин. Їх фізичний та геометричний зміст розкрито вище у теоретичній частині тексту дипломної роботи, а чисельні значення розраховані за такими програмними формулами:

$$\mathbf{C21:} \{ =C4*(1,00011+0,034221*\text{COS}((C20-1)*C14/365)+0,00128*\text{SIN}((C20-1)*C14/365)+0,000719*\text{COS}(2*(C20-1)*C14/365)+0,000077*\text{SIN}(2*(C20-1)*C14/365)) \}$$

$$\mathbf{C22:} \{ =C17*(0,006918-0,399912*\text{COS}((C20-1)*C14/365)+0,070257*1)*\text{SIN}((C20-1)*C14/365)-0,006758*\text{COS}(2*(C20-1)*C14/365)+0,000907*\text{SIN}(2*(C20-1)*C14/365)-0,002697*\text{COS}(3*(C20-1)*C14/365)+0,00148*\text{SIN}(3*(C20-1)*C14/365)) \};$$

$$\mathbf{C23:} \{ =C22*C16 \};$$

$$\mathbf{C24:} \{ 229.18*(0.000075+0.001868*\text{COS}((C20-1)*C14/365)-0,032077*\text{SIN}((C20-1)*C14/365)-0,014615*\text{COS}(2*(C20-1)*C14/365)-0,04089*\text{SIN}(2*(C20-1)*C14/365)) \};$$

$$\mathbf{C25:} \{ C24-4*(C8-C9) \};$$

$$\mathbf{C26:} \{ =C25/60 \};$$

$$\mathbf{C27:} \{ =13+C26 \};$$

$$\mathbf{C28:} \{ 13:18:00 \};$$

$$\mathbf{C31:} \{ =-C17*\text{ACOS}(-\text{SIN}(C23)/\text{COS}(C7)) \};$$

$$\mathbf{C32:} \{ =C31*C16 \};$$

$$\mathbf{C33:} \{ =-C31 \};$$

$$\mathbf{C34:} \{ =-C32 \};$$

$$\mathbf{C35:} \{ =C5^{-1}*C17*\text{ACOS}(-\text{TAN}(C7)*\text{TAN}(C23)) \};$$

$$\mathbf{C36:} \{ =C27-C35 \};$$

$$\mathbf{C37:} \{ 5:27:00 \};$$

$$\mathbf{C38:} \{ =-C35 \};$$

$$\mathbf{C39:} \{ 13-C38 \};$$

$$\mathbf{C40:} \{ 20:51:00 \};$$

$$C41: \{=C5^{-1}*C17*ACOS(TAN(C23)/TAN(C7))\};$$

$$C42: \{= C27-C41\};$$

$$C43: \{8:35\};$$

$$C44: \{=C41\};$$

$$C45: \{=C27-C44\};$$

$$C46: \{18:01:00\};$$

$$C47: \{=45\};$$

$$C48: \{=C47*C16\};$$

$$C49: \{0\};$$

$$C50: \{0\};$$

Значення меж півгодинних кроків дискретизації інсоляційних величин у шкалі локального сонячного часу оператор задає вручну режимі у колонці **D**, за винятком двох крайніх знизу комірок **D36** і **D37** для природним моментів сходу τ_{cx} і заходу τ_{zx} Сонця на/під лінією горизонту поверхні і виділених шрифтом червоного кольору. Їх значення для нахиленої поверхні наведені поряд – у комірках **F36** та **F37**. Відповідно у правіше розташованих комірках цієї стрічки, розміщені значення усіх проміжних величин, розрахунок яких вимагає додаткових уточнень вхідних величин для моментів $\tau_{cx\beta}$ початку $\tau_{cx\beta}$ і закінчення $\tau_{zx\beta}$ інсоляції нахиленої поверхні прямими променями. Часові мітки у колонках **E** і **F** приведені до годин і хвилин поясного часу з наступним їх стандартним записом.

Сім колонок від **G** до **M** включно, відведено для розрахунку поточних значень допоміжних величин – геометричних параметрів інсоляційних співвідношень. Натомість приховані колонки **N**, **O**, **P**, **Q**, **R** і **S** зарезервовані для розрахунку інших варіантів цих величини або модельних підходів. Правіше, у колонках **T**, **U**, **V**, **Z**, і **AE AF**, наведені поточні значення проміжних величин для розрахунку інтенсивності приземних сонячних променів наведені $G_{b\beta}(\tau)$ з результатами у колонці наведені **AF**. Програми розрахунку кожної функції часу складають відповідно формулам, наведеним у п. 2.3.

3.2 Моделювання потоків сонячної енергії до фотомодуля

Для цього у таблиці відведені колонки T , U , V , Z , AE , AF і AP , згрупованих поряд рис. 3.2 з вилученням неінформативних комірок.

	A	B	C	D	E	F	T	U	V	Z	AE	AF	AP
1	Вхідні величини			Часові відмітки			t	δ_R	$G_b(\tau)$	$\cos\theta(\tau)$	$\theta(\tau)$	$G_{sp}(\tau)$	$T_a(\tau)$
2	Назва	Символ	Значення	τ , год	t , год	год. хв	град	$Вт/м^2$	β (у С47)	кут осв.	$Вт/м^2$		
3	Основні вхідні величини			-7,85	5,45	5:27	36,59	0,0961	0,00675	-0,4003	113,6	-0,0027	16,052
4	Сонячна стала	G_{sc} , $Вт/м^2$	1367	-7,5	5,80	5:48	15,17	0,0468	112,636	-0,3234	108,87	-36,421	16,5134
5	Швидкість обертання Землі	ω , град/год	15	-7	6,3	6:18	7,373	0,0657	247,061	-0,2084	102,03	-51,493	17,2156
6	Широта	ϕ , град	50	-6,5	6,80	6:48	4,716	0,0779	370,123	-0,0894	95,128	-33,084	17,9618
7	--/--	ϕ , рад	0,87266	-6	7,3	7:18	3,434	0,0872	468,722	0,03172	88,182	14,87	18,7435
8	Довгота	ψ , град	24	-5,5	7,80	7:48	2,695	0,0944	547,833	0,15283	81,209	83,727	19,5524
9	Меридіан годинного поясу	ψ_2 , град	30	-5	8,3	8:18	2,223	0,1	611,961	0,27187	74,224	166,37	20,3794
10	Висота над рівнем моря	z , м	269	-4,5	8,80	8:48	1,901	0,1045	664,279	0,3868	67,244	256,94	21,2156
11	Стан атмосфери (фактор Лінке)	T_{LK}	4	-4	9,3	9:18	1,671	0,1081	707,055	0,49565	60,287	350,45	22,0519
12				-3,5	9,80	9:48	1,503	0,111	741,958	0,59657	53,376	442,63	22,8789
13		π	3,14159	-3	10,3	10:18	1,377	0,1132	770,239	0,68782	46,542	529,78	23,6878
14		2π	6,28319	-2,5	10,80	10:48	1,283	0,115	792,846	0,76784	39,839	608,78	24,4695
15	Переходи град→рад→град	$\pi/2$	1,5708	-2	11,3	11:18	1,213	0,1164	810,495	0,83527	33,356	676,98	25,2156
16		$\pi/180$	0,01745	-1,5	11,80	11:48	1,163	0,1175	823,721	0,88895	27,258	732,25	25,9179
17		$180/\pi$	57,2958	-1	12,3	12:18	1,129	0,1182	832,909	0,92797	21,88	772,91	26,5687
18				-0,5	12,80	12:48	1,109	0,1186	838,322	0,95164	17,891	797,78	27,1608
19	Полудень			0	13,3	13:18	1,103	0,1187	840,11	0,95958	16,346	806,15	27,6878

Рисунок 3.2 – Фрагмент таблиці Ексель з розрахунками просторово-часових параметрів сонячних променів

Денний розподіл температури довкілля, наведений на рис.3.3 розрахований такою програмою

$$17+8*\text{COS}(C13*((D3:D35)-3)/(2*D34))+8*\text{COS}(C13*(D3+3)/(2*D34))$$

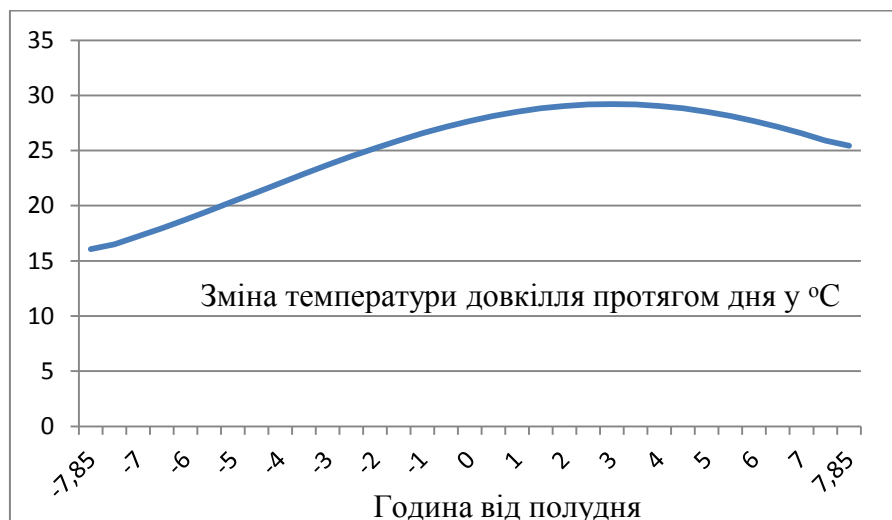


Рисунок 3.3 – Типовий графік зміни температури повітря протягом сонячного літнього дня

Розподіл у якому поточні значення близькі до типових для сонячного дня [13].
описний такою емпіричною формулою:

$$T_a = 17 + \cos \frac{\pi\tau - 3}{2 \times \tau_{\text{зх}}} + 8 \cos \frac{\pi\tau + 3}{2 \times \tau_{\text{зх}}}, \quad (3.1)$$

У крайній нижній комірці колонки **AF38** розраховано енергетичну експозицію інсольованої поверхні фотомодуля H у Вт·год за програмою, яка відповідає наведеній у 2-у розділі формулі (2.):

$$0,5*(AF3:AF35)*AF39+(0,5*(AF3+AF35)+СУММ(AF4:AF34))*0,5$$

3.3 Технічні характеристики фотомодуля JAM60S20-380/MR1500V

Згідно виданого технічного завдання на дипломну роботу, для моделювання енергетичної ефективності сонячної панелі надано фотомодуль JAM60S20-380/MR1500V виробника JA solar [www.jasolar.com]. Його технічні характеристики, наведені у таблиці 3.1, відповідають результатам тестування за двома стандартами:

- STS (Standard Test Conditions) в ідеальних умовах сонячної інтенсивності – 1000 Вт/м^2 , спектрального складу AM1,5G, відсутності вітру і температурі повітря 25°C . Дані параметри імітують ясний весняний або осінній опівдні, за умови, що промені падають на поверхню сонячного модуля під прямим кутом.

- NOCT (Normal Operating Cell Temperature) – Номінальна робоча температура сонячного елемента) рівна 20°C при сонячній інтенсивності 800 Вт/м^2 спектрального складу AM1,5G. Умови вимірювання NOCT відбуваються при відкритій задній поверхні сонячної панелі для безперешкодного охолодження її навколишнім повітрям. У більшості випадків панелі встановлюються паралельно нахиленій покрівлі, тому їх реальна робоча температура влітку буде вищою, ніж NOCT. У випадку фотомодулів використовують аббревіатуру NMOT (Nominal Module Operating Temperature).

Таблиця 3.1

Технічна характеристика фотомодуля JAM60S20-380/MR1500V

STC: спектр AM-1,5G; 1000 Вт/м²; T_c=25°C		
Максимальна потужність, P_{mpp}	Вт	375
Напруга розімкненого кола, U_{oc} або U_{xx}	В	41,45
Напруга у при максимальній потужності, U_{mpp}	В	34,5
Струм короткого замикання, I_{sc}	А	11,41
Струм у при максимальній потужності, I_{mpp}	А	10,87
Ефективність (к.к.д.), η	%	20,1
Температурний коефіцієнт, $\alpha(I_{sc})$	%/град	0,044
Температурний коефіцієнт, $\beta(U_{oc})$	%/град	-0,272
Температурний коефіцієнт потужності, $\gamma(P_{mpp})$	%/град	-0,35
Коефіцієнт заповнення ВАХ, FF	б/р	0,793
NOCT: спектр AM-1,5G; 800 Вт/м²; T_a = 20°C		
Максимальна потужність, $P_{mpp}(N)$	Вт	284
Напруга розімкненого кола, $U_{oc}(N)$ або U_{xx}	В	38,89
Напруга при максимальній потужності, $U_{mpp}(N)$	В	32,55
Струм короткого замикання, $I_{sc}(N)$	А	9,25
Струм у при максимальній потужності, $I_{mpp}(N)$	А	8,71
Коефіцієнт заповнення ВАХ, FF	б/р	0,790
Номінальна температура T_N	°C	45
Площа поверхні, S	м ²	1,866

Значення усіх трьох температурних коефіцієнтів у процентах на градус за своїм змістом відповідають зменшенню відносної величини, наприклад напруги, при зміні температури на 1°C

$$\beta \frac{\%}{^\circ C} = \frac{\Delta U}{U \times \Delta T} 100 \quad \text{відтак} \quad \Delta U = 0,01 \times \beta \times U \times \Delta T, \quad (3.2)$$

Воль амперні та вольт ватні характеристики цього модуля наведені у технічній документації виробу за заводських випробувань при сталому рівні освітленості, спектрального складу і температури сонячних елементів.

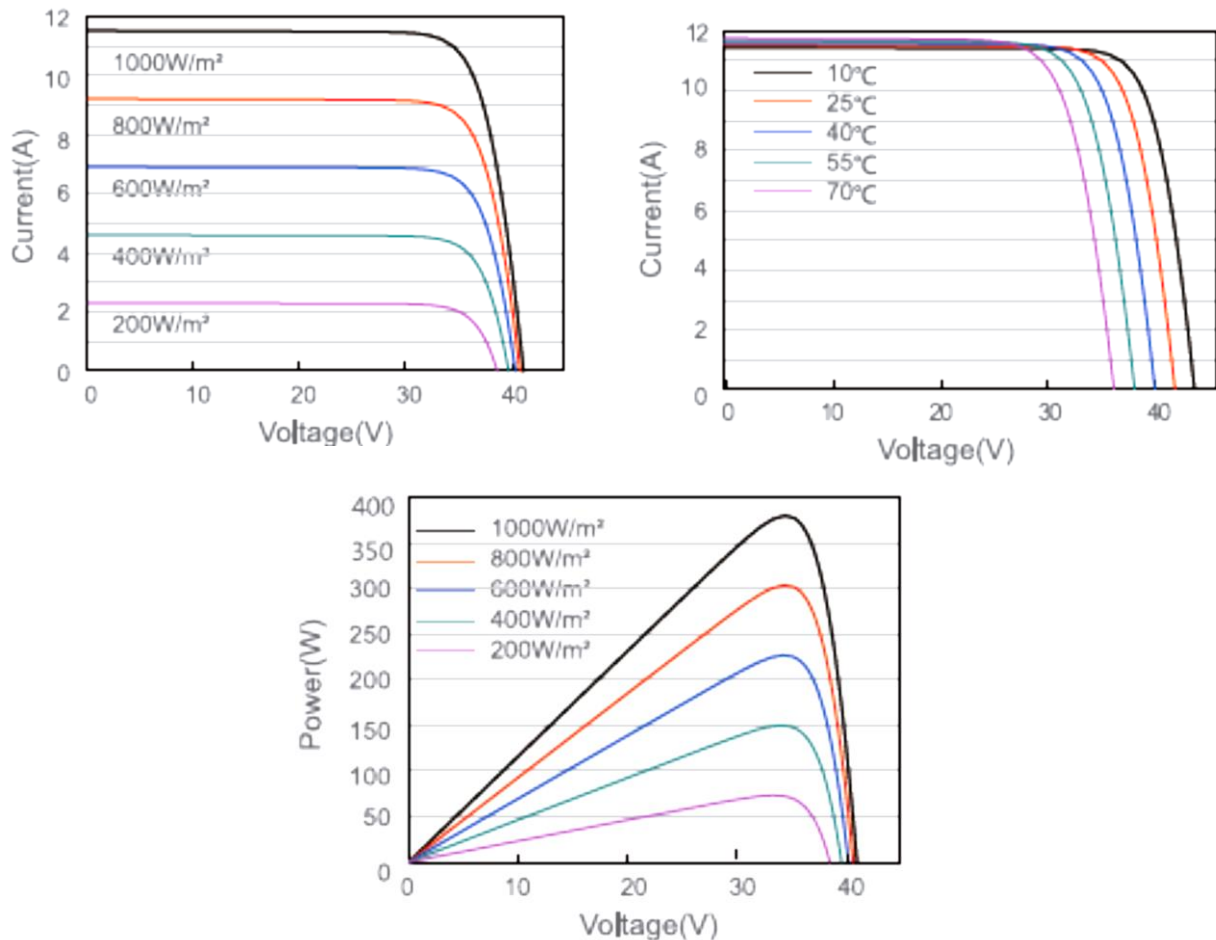


Рисунок 3.4. – Графічна ілюстрація ВАХ з технічної характеристики модуля

Поточним коефіцієнтом корисної дії фотомодуля одиничної площі будемо називати відношення максимальної вихідної електричної потужності P_{mpp} до світлової потужності (інтенсивності) прямих сонячних променів G_b . При скісному освітленні прямими сонячними променями інтенсивністю G_b і кутом падіння θ , поверхня фотомодуля опромінюється світловим потоком, чисельно рівна її енергетичній освітленості E :

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{E} = \frac{P_{mpp}}{G_b \cos \theta} \quad (3.3)$$

Зважаючи на природну нестабільність потоків сонячної енергії навіть за позірною ясним небом, на практиці зазвичай використовують відношення годинної продуктивності фотомодуля ΔW до годинної енергетичної експозиції

$$I = G_b \Delta \tau \quad (3.3)$$

$$\eta = \frac{\Delta W}{I} = \frac{\Delta W}{G_b \Delta \tau} \quad (3.4)$$

Нерідко якість фотоелектричних установок оцінюють за інтегральним (ефективним) к.к.д., рівним відношенню денної продуктивності W_d до денної експозиції поверхні фотомодуля H :

$$\eta_{\text{еф}} = \frac{W_d}{H} \quad (3.5)$$

3.4 Методика моделювання показників ефективності фотомодуля

Моделювання показників ефективності фотомодуля протягом дня ґрунтується на методиці, наведеній у вигляді прикладу на сайті Florida State University <https://esc.fsu.edu> > documents > lectures з назвою Photovoltaic Systems Engineering з посиланням на ресурси: Solar Electricity, Ed. by Tomas Markvart, Wiley, 2000 і Photovoltaic Systems Engineering, Roger Messenger & Jerry Ventre, CRC, 2000. За цією методикою пропонується розраховувати енергетичні показники фотомодуля при довільних значеннях його освітленості і температури довкілля. Додатково використовують параметри фотомодуля, наведені у його технічній характеристиці за стандартами STS і NOCT, але з незвичними термінами, позначеннями величин, та індексацією символів. Відтак, перед використанням цієї методики, проведено представлене нижче впорядкування позначень вживаних вхідних та розраховуваних величин з уточненням їх фізичного змісту: и

T_a – температура довкілля;

T_c – температура комірки при довільних значеннях вхідних величин;

$T_s = 25^\circ\text{C}$ – температура **комірки** при випробуванні за стандартом STS;

$T_a = 20^\circ\text{C}$ – температура **довкілля** при випробуванні за стандартом NOCT;

$T_N=(45\pm 2)$ °C – **номінальна** температура **комірки** при випробуванні за стандартом NOCT;

$G_S=G_{1,0}=1000$ Вт/м²=1,0 кВт/м² – освітленість комірки при випробуванні за стандартом STS;

$G_N = G_{0,8}=800$ Вт/м² або 0,8 кВт/м² – освітленість комірки при випробуванні за стандартом NOCT;

α – температурний коефіцієнт струму к.з., розмірність [α]=1/град

β – температурний коефіцієнт напруги хх, розмірність [β]=1/град

γ – температурний коефіцієнт макс. потужн. P_{mpp} розмірність [β]=1/град

$I_{sc}(S)$ – струм к.з. при випробуванні за стандартом STS

$I_{sc}(N)$ – струм к.з. при випробуванні за стандартом NOCT;

$U_{oc}(S)$ – напруга хх при температурі $T_s=25^\circ\text{C}$ за стандартом STS;

$U_{oc}(N)$ – напруга хх при температурі $T_a=20^\circ\text{C}$ за стандартом NOCT;

$P_{mpp}(S)$ – максимальна вихідна потужність ФМ у режимі випробування за стандартом за стандартом STS;

$P_{mpp}(N)$ – максимальна вихідна потужність ФМ у режимі випробування за стандартом за стандартом NOCT;

Прийmemo такі довільні поточні значення вхідних величин:

– енергетичної освітленості $G = 700$ Вт/м² = 0,7 кВт/м²;

– температури довкілля $T_a=29^\circ\text{C}$

Термін **Normal Operating Cell Temperature (NOCT)** – нормальна робоча температура комірки у режимі розімкнутого кола за нижчих від регламентованих 42...46 °C температур, і такими вхідними умовами:

– освітленість 800 Вт/м²;

– спектральний розподіл AM1.5;

– температура комірки $T_N=20^\circ\text{C}$

– швидкість вітру > 1 м/с

Для розробки програми моделювання ефективності фотомодуля, спочатку та розкриємо схему розрахунку його експлуатаційних параметрів за паспортними характеристиками (див. таблицю 3.1) та прийнятих вище значеннях G і T_a .

1. Поточний струм к.з. I_{sc} пропорційний частці інтенсивності дійсного потоку сонячної енергії від стандартного $G/G(STS)$.

$$I_{sc} = I_{sc} \frac{G}{G(STS)} = 11,41 \frac{0,7}{1} = 7,99 \text{ А}$$

2. Для розрахунку температури комірки скористаємося очевидною пропорцією відношень надлишкових температур комірки до поточної інтенсивності сонячної енергії G та при випробуванні за стандартом NOCT:

$$\frac{T_c - T_a}{G} = \frac{T_c(NOCT) - 20}{0,8} \quad \text{або} \quad T_c - T_a = \frac{T_c(NOCT) - 20}{0,8} G \quad \text{звідки}$$

$$T_c = T_a + \frac{T_c(NOCT) - 20}{0,8} G$$

Нехай $T_a = 29$ і $G = 700 \text{ Вт/м}^2$

$$T_c = 29 + \frac{45 - 20}{0,8} 0,7 = 50,88$$

3. Напруга холостого ходу

За визначенням температурного коефіцієнта

$$V_{oc} = V_{oc}(STS) (1 - \beta(T_c - T_a))$$

$$V_{oc}(50,88^\circ \text{C}) = 41,45 \times [1 - 0,00272 \times (50,88 - 29)] = 38,98$$

4. FF – Коефіцієнт заповнення ВАХ за параметрами двох стандартів STS і NOCT

$$FF(STS) = \frac{P_{mpp}(S)}{I_{кз}(S)U_{хх}(S)} = \frac{370}{41,45 \times 11,41} = 0,7844$$

$$FF(NOCT) = \frac{284}{38,89 \times 9,25} = 0,7895$$

Різниця між обома значеннями не перевищує 0,5%, що дає підставу вважати його практично постійною величиною для розрахунку максимальної потужності при усіх поточних значеннях максимальної потужності P_{mpp} .

5. Максимальна вихідна потужність

$$P_{mpp} = FF \times I_{sc} V_{oc} = 0,7895 \times 7,99 \times 38,98 = 245,95$$

Висновок: Фотомодуль працює в умовах, близьких умовах до вимог стандарту NOCT, тому й розраховані показники ефективності також близькі до наведених у технічному паспорті виробу.

3.5 Моделювання параметрів енергетичної ефективності фотомодуля JAM60S20-380/MR1500V

Чисельне моделювання характеристик фотомодуля у режимах роботи, близьких природному освітленню і температурі довкілля, проведене у програмному середовищі Ексель. Для цього попередній формат таблиці доповнено новими колонками, розміщених у порядку наведеної вище у п. 3.4 схеми оцінки ефективності фотомодуля. Відповідний фрагмент розширеної таблиці Ексель наведено нижче на рис. 3.5. у якій приховані усі колонки від **D** до **AE** включно, за винятком **AF**, бо наведені там результати не використовуються для розрахунку параметрів ВАХ у колонках від **AP** до **BA**. Зате додатково розміщено таблицю з паспортними технічними характеристиками фотомодуля.

У колонках **AT**, **AU**, **AV**, **AW**, **AZ** і **BA** за наведеним у попередньому пункті 3.4 прикладом, розраховані поточні значення температури фотомодуля, T_c , різниці температур фотомодуля та довкілля $T_c - T_a$, струму короткого замикання I_{sc} , напруги відкритого кола U_{oc} , максимальної потужності P_{mpp} , к.к.д. η коефіцієнта FF заповнення ВАХ FF .

Для побудови графіків часових залежностей поточної потужності і к.к.д. фотомодулів при різних кутах нахилу, результати їх розрахунку згруповані в окремих колонках – від **BC** до **BP** включно командами копіювання.

A	B	C	D	AF	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AY	AZ	BA
Вхідні величини			Час	$G_p(t)$	$T_a(t)$				T_c	T_c-T_a	I_{sc}	U_{oc}	P_{mpp}	η	FF
Назва	Символ	Значення	t, год	Bm^2							I_{sc}	U_{oc}	P_{mpp}	η	FF
Основні вхідні величини			-7,85	-0,0038	16,1	STC: спектр AM-1,5G; 1000 Вт/м ² ; T _c =25°C;			16,1	-0	-0	41,45	-0	0,201	0,793
Сонячна стала	G_{sc} , Вт/м ²	1367	-7,5	-57,108	16,5	Номинальна макс.потужність, P_{mpp}	Вт	375	14,7	-1,8	-0,65	41,65	-21,5	0,202	0,793
Швидкість обертання Землі	ω , град/год	15	-7	-103,43	17,2	Напр. розімкненого кола, U_{oc}	В	41,45	14	-3,2	-1,18	41,81	-39,1	0,203	0,793
Широта	ϕ , град	50	-6,5	-121,07	18	Напряга у точ. макс. потужн., U_m	В	34,5	14,2	-3,8	-1,38	41,88	-45,9	0,203	0,793
--	ϕ , рад	0,8727	-6	-109,67	18,7	Струм коротого замикання, I_{sc}	А	11,41	15,3	-3,4	-1,25	41,84	-41,5	0,203	0,793
Довгота	ψ , град	24	-5,5	-77,157	19,6	Струм у точці макс. потужн., I_m	А	10,87	17,1	-2,4	-0,88	41,72	-29,1	0,202	0,793
Меридіан годинного поясу	ψ_2 , град	30	-5	-30,172	20,4	Ефективність (к.к.д.), η	%	20,1	19,4	-0,9	-0,34	41,56	-11,3	0,202	0,793
Висота над рівнем моря	z , м	269	-4,5	25,955	21,2	Температурний коефіцієнт, $\alpha(U_{oc})$	%/град	0,044	22	0,81	0,3	41,36	9,71	0,201	0,793
Стан атмосфери (фактор Лінке)	T_{LK}	4	-4	86,811	22,1	Температурний коефіцієнт, $\beta(U_{oc})$	%/град	-0,272	24,8	2,71	0,99	41,14	32,3	0,2	0,793
			-3,5	148,67	22,9	Температурний коеф. потужн., $\gamma(P_{mpp})$	%/град	-0,35	27,5	4,65	1,7	40,93	55	0,198	0,793
	π	3,1416	-3	208,39	23,7	Коефіцієнт заповнення ВАХ, FF	б/р	0,793	30,2	6,51	2,38	40,72	76,8	0,197	0,793
	2π	6,2832	-2,5	263,29	24,5	NOCT: спектр AM-1,5G; 800 Вт/м ² ; T _a = 20°C			32,7	8,23	3	40,52	96,5	0,197	0,793
Переходи град-град-град	$\pi/2$	1,5708	-2	311,18	25,2	Номинальна макс.потужність, $P_m(N)$	Вт	284	34,9	9,72	3,55	40,35	114	0,196	0,793
	$\pi/180$	0,0175	-1,5	350,26	25,9	Напр. розімкненого кола, $U_{oc}(N)$	В	38,89	36,9	10,9	4	40,22	127	0,195	0,793
	180/ π	57,296	-1	379,15	26,6	Напряга у точці макс. потужн., $U_m(N)$	В	32,55	38,4	11,8	4,33	40,11	138	0,195	0,793
			-0,5	396,88	27,2	Струм коротого замикання, $I_{sc}(N)$	А	9,25	39,6	12,4	4,53	40,05	144	0,194	0,793
Полудень			0	402,85	27,7	Струм у точці макс. потужн., $I_m(N)$	А	8,71	40,3	12,6	4,6	40,03	146	0,194	0,793
--	Δt , год	0,2999	3,5	148,67	29,2				33,8	4,65	1,7	40,93	55	0,198	0,793
Полудень поясний	t , год	13,3	4	86,811	29				31,8	2,71	0,99	41,14	32,3	0,2	0,793
--	t , годхв	13:18	4,5	25,955	28,8				29,6	0,81	0,3	41,36	9,71	0,201	0,793
			5	-30,172	28,5				27,6	-0,9	-0,34	41,56	-11,3	0,202	0,793
			5,5	-77,157	28,1				25,7	-2,4	-0,88	41,72	-29,1	0,202	0,793
Горизонтальна поверхня															
Азимут сходу Сонця	$A_{сх}$, град	-124,5	6	-109,67	27,7				24,3	-3,4	-1,25	41,84	-41,5	0,203	0,793
--	радіан	-2,173	6,5	-121,07	27,2				23,4	-3,8	-1,38	41,88	-45,9	0,203	0,793
Азимут заходу Сонця	$A_{зх}$, град	124,49	7	-103,43	26,6				23,3	-3,2	-1,18	41,81	-39,1	0,203	0,793
--	радіан	2,1728	7,5	-57,108	25,9				24,1	-1,8	-0,65	41,65	-21,5	0,202	0,793
Момент сходу Сонця	$t_{сх}$, год	7,8505	7,85	-0,0038	25,4				25,4	-0	-0	41,45	-0	0,201	0,793
- за поясним часом	$t_{сх}$, год	5,4493	-4,724	0											
--	годхв	5:27	4,724	0											
Момент заходу Сонця	$t_{зх}$, год	-7,851		2305,55											
- за поясним часом	$t_{зх}$, год	20,851		0,2238											
--	годхв	20:51													
Момент переходу через $\gamma_s=90^\circ$	t_{γ_s} , год	4,7238													
- за поясним часом	t_{γ_s} , год	8,576													
--	годхв	8:35													
Момент переходу через $\gamma_s=-90^\circ$	t_{γ_s} , год	-4,724													
- за поясним часом	t_{γ_s} , год	18,024													
--	годхв	18:01													
Кут нахилу поверхні	β , град	90													
--	радіан	1,5708													
Азимут поверхні	γ , град	0													
--	радіан	0													

Рисунок 3.5 – Фрагмент таблиці Ексель з колонками для розрахунку параметрів ефективності фотомодуля



Рисунок 3.6 – Типова залежність температури фотомодуля протягом сонячного літнього дня

	D	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP
1	Час	P_{mpp} у Вт; 17 липня, $n = 198$; $T_{LK} = 4$							$\eta_{ef}(H_b)$						
2	τ , год	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
3	-7,9														
4	-7,5	2,09927							0,2009						
5	-7	11,4474	1,04749						0,2005	0,201					
6	-6,5	27,679	15,1032	1,4225					0,1997	0,2003	0,2009				
7	-6	48,4665	36,3917	21,774	5,5691				0,1988	0,1993	0,2	0,2007			
8	-5,5	72,1178	62,4398	48,5	31,174	11,581			0,1977	0,1981	0,1988	0,1996	0,2005		
9	-5	97,3017	91,2575	79,083	61,508	39,613	14,786		0,1965	0,1968	0,1973	0,1982	0,1992	0,2003	
10	-4,5	122,902	121,212	111,48	94,249	70,53	41,748	9,7118	0,1952	0,1953	0,1958	0,1966	0,1977	0,1991	0,2006
11	-4	147,975	150,952	144,01	127,51	102,35	69,976	32,314	0,194	0,1939	0,1942	0,195	0,1962	0,1978	0,1995
12	-3,5	171,725	179,365	175,3	159,74	133,47	97,903	55,048	0,1928	0,1925	0,1927	0,1934	0,1947	0,1964	0,1985
13	-3	193,492	205,542	204,27	189,72	162,6	124,26	76,761	0,1918	0,1912	0,1912	0,1919	0,1933	0,1952	0,1974
14	-2,5	212,735	228,76	230,03	216,48	188,72	148,04	96,525	0,1908	0,19	0,1899	0,1906	0,192	0,194	0,1965
15	-2	229,022	248,447	251,91	239,26	211,03	168,46	113,61	0,19	0,189	0,1888	0,1894	0,1909	0,193	0,1957
16	-1,5	242,017	264,171	269,4	257,5	228,94	184,91	127,44	0,1893	0,1881	0,1879	0,1885	0,19	0,1922	0,195
17	-1	251,471	275,615	282,14	270,8	242,02	196,95	137,6	0,1888	0,1875	0,1872	0,1878	0,1893	0,1916	0,1945
18	-0,5	257,209	282,564	289,88	278,88	249,98	204,29	143,81	0,1885	0,1872	0,1868	0,1874	0,1889	0,1912	0,1942
19	0	259,134	284,894	292,47	281,59	252,65	206,75	145,9	0,1884	0,1871	0,1867	0,1872	0,1887	0,1911	0,1941
20	0,5	257,209	282,564	289,88	278,88	249,98	204,29	143,81	0,1885	0,1872	0,1868	0,1874	0,1889	0,1912	0,1942
21	1	251,471	275,615	282,14	270,8	242,02	196,95	137,6	0,1888	0,1875	0,1872	0,1878	0,1893	0,1916	0,1945
22	1,5	242,017	264,171	269,4	257,5	228,94	184,91	127,44	0,1893	0,1881	0,1879	0,1885	0,19	0,1922	0,195
23	2	229,022	248,447	251,91	239,26	211,03	168,46	113,61	0,19	0,189	0,1888	0,1894	0,1909	0,193	0,1957
24	2,5	212,735	228,76	230,03	216,48	188,72	148,04	96,525	0,1908	0,19	0,1899	0,1906	0,192	0,194	0,1965
25	3	193,492	205,542	204,27	189,72	162,6	124,26	76,761	0,1918	0,1912	0,1912	0,1919	0,1933	0,1952	0,1974
26	3,5	171,725	179,365	175,3	159,74	133,47	97,903	55,048	0,1928	0,1925	0,1927	0,1934	0,1947	0,1964	0,1985
27	4	147,975	150,952	144,01	127,51	102,35	69,976	32,314	0,194	0,1939	0,1942	0,195	0,1962	0,1978	0,1995
28	4,5	122,902	121,212	111,48	94,249	70,53	41,748	9,7118	0,1952	0,1953	0,1958	0,1966	0,1977	0,1991	0,2006
29	5	97,3017	91,2575	79,083	61,508	39,613	14,786		0,1965	0,1968	0,1973	0,1982	0,1992	0,2003	
30	5,5	72,1178	62,4398	48,5	31,174	11,581			0,1977	0,1981	0,1988	0,1996	0,2005		
31	6	48,4665	36,3917	21,774	5,5691				0,1988	0,1993	0,2	0,2007			
32	6,5	27,679	15,1032	1,4225					0,1997	0,2003	0,2009				
33	7	11,4474	1,04749						0,2005	0,201					
34	7,5	2,09927							0,2009						
35	7,85														
36	-4,72	2216,18	2304,82	2254,7	2070,8	1762,8	1348,8	840,98	W	Вт·год					
37	4,724	5003	5430	5486	5168	4498	3521	2306	H	Вт·год/м ²					
38		0,0005	0,0587	0,0452	0,1306	0,2366	0,2	0,2238	$\Delta\tau$	год					
39		0,23743	0,22751	0,2203	0,2148	0,2101	0,2053	0,1955	η						
40		0	15	30	45	60	75	90	β	град					

Рисунок 3.7 – Фрагмент таблиці Ексель з матрицями розрахованих значень поточних та інтегральних показників ефективності фотомодуля протягом дня Крайні верхні та нижні комірки відсутні у ці часові інтервали фотомодуль прямими сонячними променями не освітлюється (див. рис. 3.8).

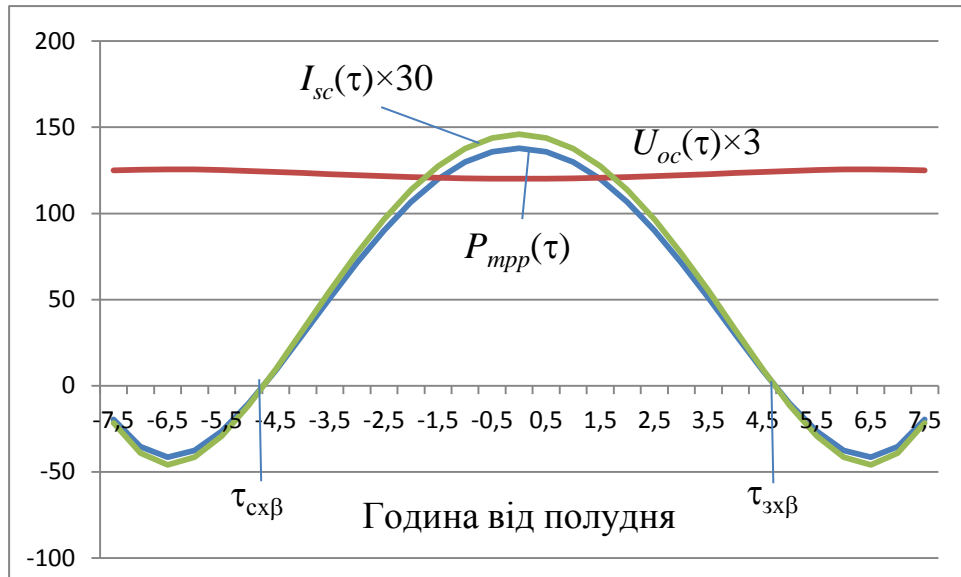


Рисунок 3.8 – Часові обмеження значень модельованих величин для фотомодуля з кутом нахилу $\beta = 90^\circ$

На рисунку 3.9 співставлені графіки зміни вихідної поточної фотомодуля потужності протягом дня при різних кутах нахилу, побудованих за наведеними у першій матриці результати моделювання. За ними також зручно візуально відстежувати моменти початку і закінчення інсоляції фотомодуля прямими сонячними променями, максимальну потужність у полудень за висотою максимумів, а також денну продуктивність за площами під кривими.

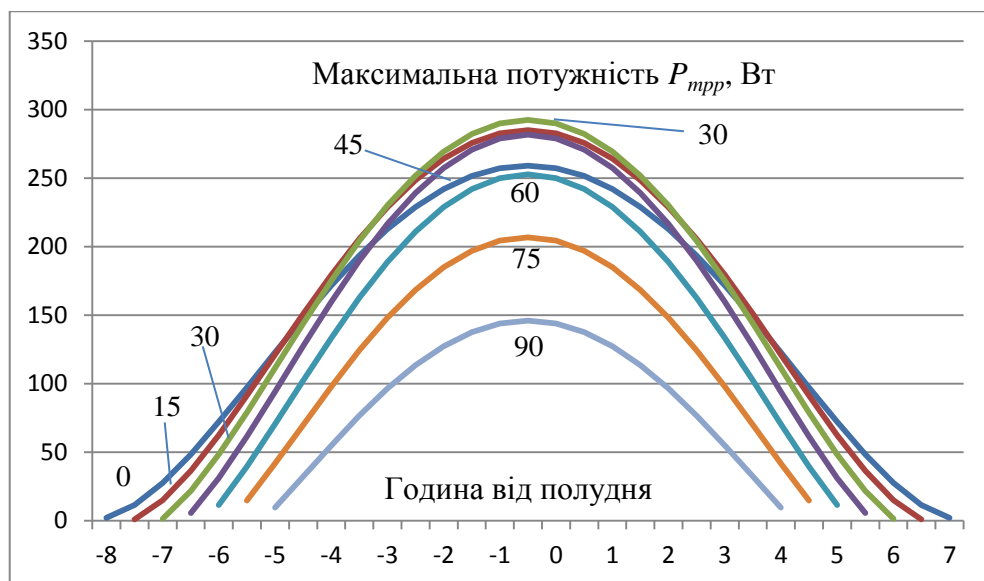


Рисунок 3.9 – Зміни поточної потужності фотомодуля з кутом освітлення

На рис. 3.10 наведені графіки оцінки поточного к.к.д у залежності від години дня та при різних кутах нахилу. Максимальним значенням к.к.д. відповідають ранкові та надвечірні режими інсоляції, а мінімальним у сонячний полудень. Найбільша різниця їх абсолютних значень $\Delta\eta=0,0166$ виявлена для горизонтального фотомодуля, а відносна становить 1.2%. У повній відповідності з теоретичними викладками, вища ефективність фотоелектричного перетворення відповідає меншій температурі фотомодуля. Але у жодному випадку максимальне значення к.к.д. не перевищує наведеного у паспорті виробу 20,1%.

На рис. 3.10 наведено графік зростання виробництва електроенергії протягом дня з півгодинним інтервалом реєстрації. Тому його складено додаванням половинних значень попереднього показника поточної потужності до наступного з матриці потужності, що на рис. 3.7.

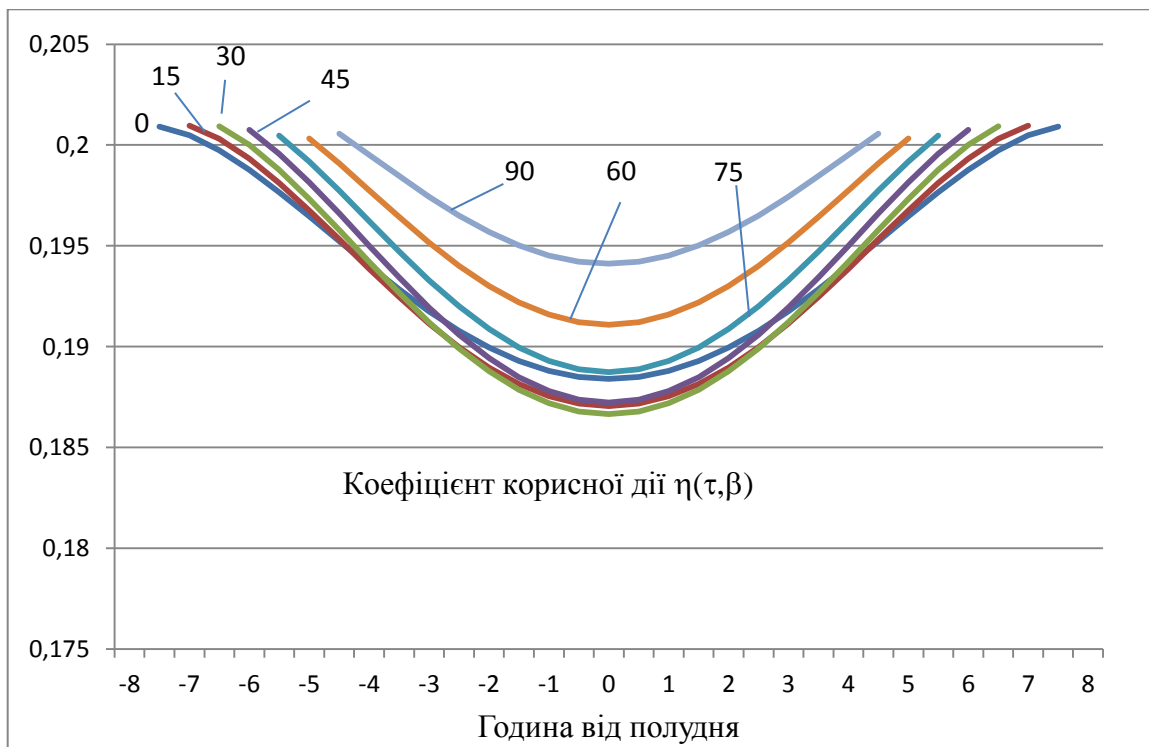


Рисунок 3.10 – Зміни поточного к.к.д. фотомодуля протягом дня у залежності від кута освітлення

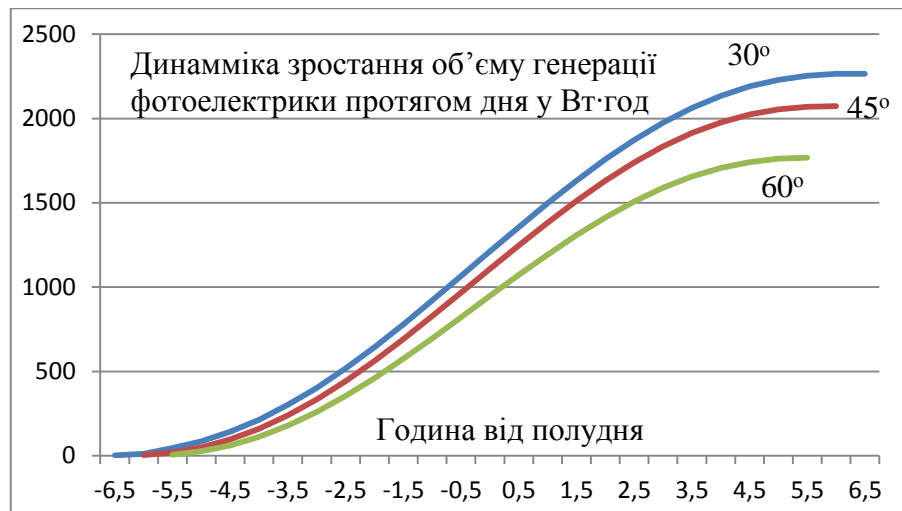


Рисунок 3.11 – зміна динаміки виробництва електроенергії протягом дня

На рис. 3.12 наведено графіки залежності денної експозиції поверхні фотомодуля та його продуктивності у залежності від кута освітлення. За такого представлення зручно оцінювати оптимальні кути нахилу фотомодуля станом на поточний день року та завчасно їх змінювати.

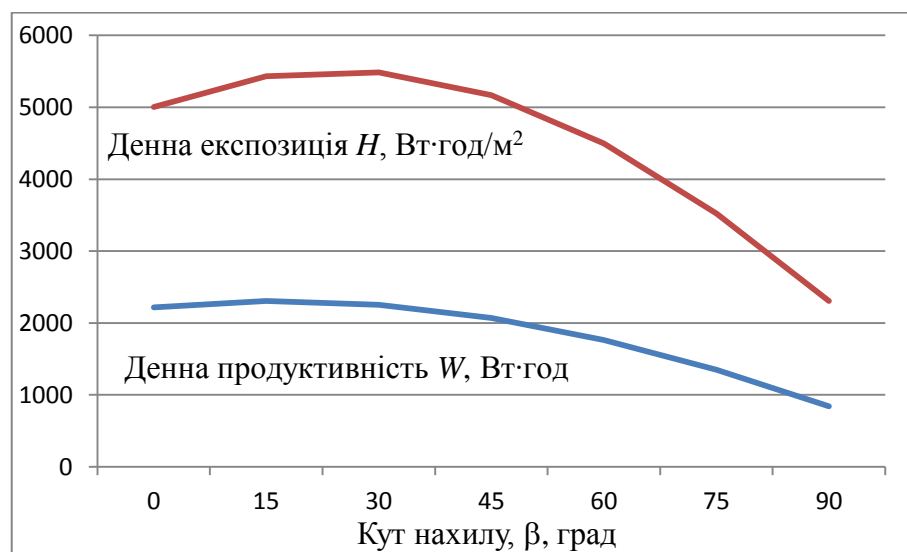


Рисунок 3.12 – Залежність денної експозиції та продуктивності фотомодуля від кута його нахилу

Інтегральний показник ефективності роботи фотоелектричної установки – ефективний к.к.д., оцінюють відношенням об'єму генерованої фотоелектрики W до денної експозиції фотомодуля H : $\eta_{\text{еф}} = W/H$, залежність якого від кута освітлення наведено на рис. 3.13.

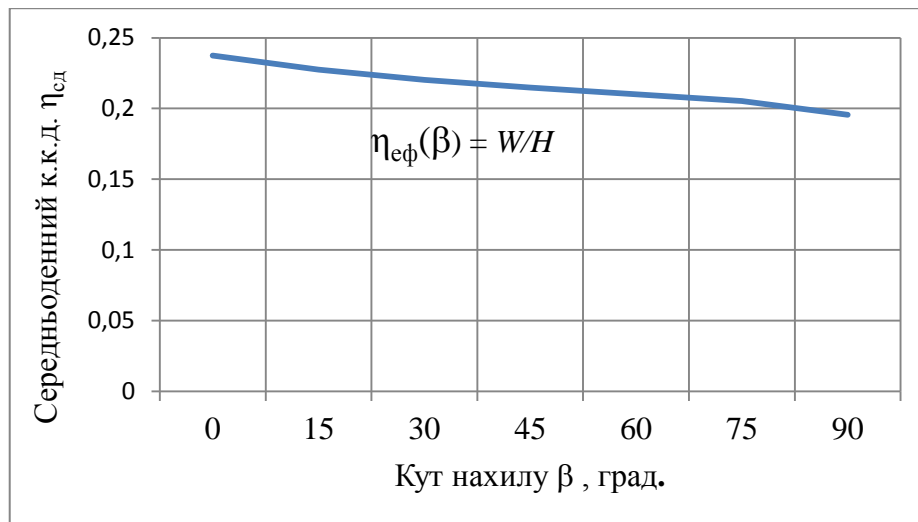


Рисунок 3.13 – Залежність ефективного (середньоденного) к.к.д. фотомодуля від кута його нахилу

За цією та іншими інтегральними характеристиками ефективності зручно прогнозувати об'єми виробництва електроенергії, звіряти його з фактично досягнутим на поточну годину дня, а також оцінювати економічні показники роботи фотоелектричних систем станом на поточний день, тиждень, місяць чи сезон року.

Розділ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Організаційно-правові заходи

Гарантії прав на охорону праці починаються вже з моменту обговорення та укладання трудової угоди. Згідно ст. 5 Закону «Про охорону праці» умови трудового договору не можуть містити положень, що суперечать законам та іншим нормативним актам. Під час укладання трудового договору роботодавець повинен проінформувати працівника під розписку про умови праці та про наявність на його робочому місці небезпечних і шкідливих виробничих факторів і можливі наслідки їх впливу на здоров'я. А також та про права працівника на пільги і компенсації за роботу в таких умовах.

Працівнику не можна пропонувати роботу, протипоказана йому за станом здоров'я та медичним висновком. До виконання роботи з підвищеною небезпекою допускаються тільки особи за наявності висновку психофізіологічної експертизи.

Комплекс заходів з охорони праці для мінімізації ризику професійного захворювання та травматизму працівників, пов'язаних з експлуатації чи діагностикою фотоелектричних установок, передбачає попердню розробку інструкції з охорони праці на робочому місці. Для цього потрібно:

1. Провести аналіз умов праці для персоналу, пов'язаних з роботою відділу діагностики, які працюють у складі електроенергетичної системи України, за міждержавним ДСТУ 12.0.003-2015
2. Розробити організаційно-технічні рішення з охорони праці при виконанні робіт з підвищеною небезпекою: на висоті встановлення сонячних панелей, всередині приміщень для монтажу пусконаладувальних операцій електрообладнання та обслуговування акумуляторів.

4.2 Безпека роботи з сонячними панелями на висоті

Сонячні панелі зазвичай генерують постійний струм напругою біля 22 В при розімкненому зовнішньому колі та 15 вольт режимі навантаження. При їх комутації в енергетичні установки напруга зростає до рівня реальної небезпеки

ураження персоналу. Тому правила поведження з ними такі ж як і при роботі на електроустановках змінного струму. Монтаж, експлуатація і технічне обслуговування системи сонячного електропостачання вимагає відповідного рівня технічних знань і дотриманням загальних правил техніки безпеки при електромонтажних та налагоджувальних роботах.

Усі роботи ведуть на висоті часто поряд з повітряними лініями електропередачі, які вимагають додаткових організаційних заходів для безпеки. Перед початком робіт потрібно відвідати об'єкт з метою виявлення потенційних небезпек на місці монтажних робіт. Наприклад обмежити зону роботи огороженням, перебачити відповідне екіпірування – захисні каски, рукавички, нековзне спецвзуття.

Сонячні панелі та монтажні засоби часто громіздкі та незручні для переміщення на монтажному майданчику обмеженої площі. Тому будь-які операції з панелями з ними повинні виконуватися як мінімум удвох, щоб уникнути будь-яких травм або пошкоджень.

При монтажних роботах елементи фотоелектричних установок можуть випадково опинитися під напругою, тому важливо дотримуватися запобіжних заходів – попередньо знеструмити об'єкт і додатково перевірити відсутність напруги. Металеві корпуси панелей потрібно заземлювати для відводу високовольтних імпульсів комутаційних напруг та впливу атмосферної електрики.

4.3 Вимоги до комфорту приміщень з тестування фотомодулів

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні лабораторії підтримують допустимі значення температури, відносної вологості і швидкості потоків повітрообміну у діапазонах, оптимальних для поточного сезону року, категорії робіт і допустиму. Нормовані параметри мікроклімату у робочій зоні зводяться до таких вимог:

1. Температура внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочої зони і поверхонь обладнання при забезпеченні оптимальних параметрів мікроклімату не повинні відхилятися від нормативної більше ніж на 2°C

2. Якщо температура поверхонь вище або нижче оптимальної температури повітря, то робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань з врахуванням зон комфорту.

3. Для забезпечення нормованих значень повітрообміну проектом передбачається витяжна та припливна вентиляційні системи.

Робочою зоною вважається простір, обмежений огорожувальними конструкціями виробничих приміщень, висотою не меншу 2 м над рівнем підлоги. Склад повітря всередині робочої зони залежить від складу зовнішнього атмосферного повітря і впливу на нього ряду шкідливих виробничих факторів, утворених в процесі трудової діяльності людини. Склад повітря залишається постійним, а його забруднення регламентується гранично допустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³. Для його нормалізації у робочій зоні потрібно щоденне прибирання робочих місць з видалення пилу регулярним протирання робочих зон у неробочий час та вимкненим обладнанням.

Якість освітлення приміщень дослідних лабораторій та промислових зон, залежно від джерела світла, поділяють на:

- природне від неба через світлові прорізи в зовнішніх огорожених конструкціях, найсприятливіше за спектральним складом. Світловий комфорт робочої зони характеризують коефіцієнтом природної освітленості (КПО), рівним відношенню освітленості природним потоком робочої та горизонтальної поверхні.

– прийняте роздільне нормування КЕО для бічного і верхнього освітлення, оскільки нормується мінімальне значення КПО в межах робочих зон, найбільш віддалених від вікна.

Штучне освітлення поділяють на загальне та комбіноване. При загальному світильники розміщуються у верхній зоні приміщення рівномірно або пристосовані до розташування технологічного обладнання. Комбіноване освітлення складається з загального та місцевого від світильників, які концентрують світловий потік безпосередньо на робочих місцях у такому відношенні загальне – 300 лк; комбіноване – 1000 лк.

ОБГРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

Економічний ефект від впровадження методики моделювання залежить від області її використання. На етапі проектування фотоенергетичних установок скорочується час на обґрунтування вибору майданчика, комплектації обладнання, прогнозування об'ємів генерування потужності та споживання.

На етапі експлуатації фотоелектричних установок економічний ефект очікується за рахунок оперативного визначення відхилень роботи сонячних панелей від прогнозованих оптимальних режимів. Кількісно їх можна оцінити результатами натурних випробувань діючих енергетичних установок з постійним моніторингом енергетичної освітленості і температури фотомодуля з його вихідною потужністю.

Графічне порівняння результатів моделювання з поточними показниками ефективності фотомодулів дозволяє своєчасно виявляти відхилення у роботі фотоелектричних установок від прогнозованих режимів та обґрунтовувати заходи з їх оперативного усунення. При цьому економічний ефект оцінюється як від підвищення продуктивності фотоелектричних установок так і зменшення вимог до кваліфікації операторів чи користувачів фотоелектричних установок і кількості обслуговуючого персоналу тощо.

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

1. Розроблена методика моделювання енергетичних показників ефективності сонячних панелей у природних умовах їх роботи з використанням паспортних технічних характеристик сонячних панелей, визначених за двома стандартами тестування STS і NOCT. Методика використовує популярне програмне середовище Ексель, доступне для широкого кола користувачів сонячної енергетики з мінімальними навчаннями комп'ютерного оператора.

2. Параметри ефективності сонячних панелей дотепер традиційно визначають з експериментально вольтамперних характеристик за громіздкою процедурою їх чисельно моделювання. Натомість їх пропонується розраховувати за відомими паспортними характеристиками фотомодулів.

3. Реальні умови інсоляції сонячних панелей моделюються усередненими таблично заданими значеннями потоків сонячної радіації до поверхні фотомодуля упродовж дня, наведених у метеорологічних базах даних. Денний розподіл їх інтенсивності у роботі моделюється що півгодинними значеннями, розрахованими у наближенні ясного неба за методикою Європейського Атласу сонячної радіації.

4. Процедура оперативної оцінки ефективності сонячних панелей чи її прогнозування зводиться до введення кількох вхідних величин у програмі комп'ютерного моделювання і наступним порівнянням його результатів з фактичними показниками поточної ефективності сонячного модуля.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Безручко К.В., Книш Л.І., Сінченко С.В. Забезпечення точності опису характеристик груп фотоперетворювачів і фотоелектричних батарей на основі цільових експериментів на комплексному обладнанні. Відроджена енергетика. 2020. № 3, с. 35.-41.
2. Щур І.З., Климко В.І., 2014 Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра ЕПК. Прогнозування ефективності роботи фотоелектричних панелей у місті Львові. С.88- 94. УДК 621.311.25.
3. King D. L., Boyson W. E., Kratochvil J. A. Photovoltaic array performance model. Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico, 2004. p. 40.
4. Hongmei Tian, Eduard Muljadi. A Detailed Performance Model for Photovoltaic Systems. Preprint Journal. Article NREL/JA-5500-54601. 2012, p. 54.
5. Андропова О.В., Курак В.В., Дон Н.Л. Моделювання роботи фотоелектричних панелей з використанням середовища MATLAB/SIMULINK //Вісник ХНТУ, №3(78), 2021 р. с. 11-19
- 6 Гаевский А.Ю. Визначення параметрів фотоелектричних модулів на основі точного розв’язку рівняння для ВАХ. Відроджена енергетика. 2012. № 4. С. 32-39.
7. Tamer Khatib, Wilfried Elmenreich. Modeling of photovoltaic systems MATLAB. Willey, Hoboken, New Jersey, 2016. p. 217.
8. Сонячні панелі JAM60S20 365-390/MR/1500V. Електронний ресурс. Режим доступу www.jasolar.com , Дата звертання 7.01.2025 р.
9. Scharmer K., Greif J. The European Solar Radiation Atlas, vol. 1: fundamentals and maps. Paris: Les Presses de l’École des Mines, 2000. 98 p.
10. Rigollier C., Bauer O., Wald L. On the clear sky model of the 4th European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat method. Solar Energy, 68(1), 2000. p. 33-48.
11. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы. Теория и эксперимент/ пер. с англ. Под ред. М.М. Колтуна. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280с.

12. Giovanni Petrone, Carlos Andrés Ramos-Paja, Giovanni Spagnuolo. Photovoltaic Sources Modeling. JohnWiley & Sons Ltd. First published 2017, 186 p.
13. Hugo Nunes, Maria Do Rosario Calado, Silvio Mariano, and Jose Pombo An Experimental Analysis of the Electrical Parameter Variation of a Photovoltaic Module // International Congress on Engineering — Engineering for Evolution Volume 2020. Page 820 820–832. DOI 10.18502/keg.v5i6.7102.
14. Giovanni Petrone, Carlos Andrés Ramos-Paja, Giovanni Spagnuolo. Photovoltaic Sources Modeling. 2017 JohnWiley & Sons Ltd.
15. Mukund R. Patel. Wind and solar power systems. CRC Press, LLC, 2000 N.W., Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431.
16. Гальчак В.П.Б, Боярчук В.М., Сиротюк В.М, Сиротюк. С.В. Параметри прямого потоку сонячної енергії при ясному небі з урахуванням прозорості атмосфери.// Відновлювана енергетика. 2019. №2, с. 22-31.; 6.
17. Сиротюк С.В., Гальчак В.П., Боярчук В.М., та ін. Порівняльна оцінка ефективності стеження за Сонцем одновісними поворотними пристроями. Відновлювана енергетика, 2022. с.1-8.
18. Гальчак В.П., Боярчук В.М., Сиротюк С.В., Коробка С.В. Саницький Т.О. Сонячна енергія та інсоляція. Львів:Магнолія , 2024. 242 с.