

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня освіти

на тему:

**«Розробка лабораторного стенда та методики дослідження
продуктивності фотоелектричного модуля залежно від режимів
освітлення»**

Виконав: студент 6 курсу

групи Ен-62 спеціальності 141

„Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка”

_____ (шифр і назва спеціальності)

_____ СОРОКА В. С.

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**

Сороці Василю Степановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Розробка лабораторного стенда та методики дослідження продуктивності фотоелектричного модуля залежно від режимів освітлення» 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. Аналіз енергоефективності сонячних панелей протягом дня.

4.2. Природа непродуктивних втрат фотомодуля протягом дня.

4.3. Розробка лабораторного стенда і методики дослідження ефективності фотомодуля.

4.4. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.

4.5. Обґрунтування економічної ефективності заходів з підвищення ефективності 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	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз ефективності сонячних панелей протягом дня</i>	12.09.2024 – 30.09.2024	
2	<i>Природа непродуктивних втрат фотомодуля протягом дня</i>	02.10.2024 – 25.10.2024	
3	<i>Розробка лабораторного стенда і методики дослідження ефективності фотомодуля</i>	21.10.2024 – 22.11.2024	
4	<i>Охорона праці та безпека 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 _____ Сорока В.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Гальчак В. П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

УДК 620.92:621.383

Сорока В.С. «Розробка лабораторного стенда та методики дослідження продуктивності фотоелектричного модуля залежно від режимів освітлення керівник роботи». Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет природокористування, 2024 р. 52 с. текстової частини, 25 рисунків, 21 джерело посилання.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності роботи сонячних панелей у складі фотоелектричних установок оптимізації режимів освітлення у природних умовах та з врахуванням їх поточних характеристик. Для досягнення поставленої мети, необхідно виконати наступні **завдання**: проаналізувати природу непродуктивних втрат потенціалу сонячної енергії на вході входу у фотоелектричні модулі протягом усього дня

Для кількісної оцінки оптичних втрат розробити лабораторний стенд з полярно-поворотним механізмом стеження за Сонцем з попереднього дослідження режимів інсоляції поверхні фотомодулів при різних кутах освітлення та спектрального складу сонячних променів протягом дня. Пристрій стеження обладнати електричною схемою керування поворотами та вимірювання робочих характеристик фотомодуля у режимі дискретного сканування напрямів на Сонце. Розробити методику вимірювання та обробки результатів з метою їх приведення до типових умов експлуатації

Ключові слова: Сонячна енергія, спектр, фотоелектричний модуль коефіцієнт відбивання, втрати продуктивності, сонячний трекер

ЗМІСТ

	Вступ.....	6
1	АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ПРОТЯГОМ ДНЯ	7
1.1	Показники ефективності сонячних панелей	7
1.2	1.2 Оптичні втрати у скляному покритті сонячних елементів	9
1.3	Мінімізація оптичних втрат на межі розділу прозорих покриттів	14
2	ПРИРОДА НЕПРОДУКТИВНИХ ВТРАТ ФОТОМОДУЛЯ ПРОТЯГОМ ДНЯ	20
2.1	Режими інсоляції фотомодуля протягом дня	24
2.2	Наближення ясного неба	
2.3	Реальні режими інсоляції фотомодуля протягом дня та методика вимірювання параметрів його ефективності	28
3	РОЗРОБКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФОТОМОДУЛЯ	33
3.1	Пристрій зміни кутів освітлення протягом дня	33
3.2	Електрична схема і алгоритм керування кутовими відхиленнями..	36
3.3	Особливі прийоми вимірювання та інтерпретації результатів	38
4	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	42
4.1	Правові питання	42
4.2	Безпека роботи з сонячними панелями на висоті	43
4.3	Безпека роботи з силовим обладнанням	43
4.4	Вимоги до виробничого освітлення	44
4.4	Умови безпечної роботи з акумуляторами	45
5	ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХОДІВ З ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ.....	47
5.1	Економічна ефективність заходів з підвищення ефективності сонячних панелей	
	ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ.....	49
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	50

ВСТУП

Значна частка генерованої в Україні електроенергії покривається за рахунок фотоелектрики, яка ґрунтується на технічних засобах різної одиничної потужності, продуктивності та ефективності усіх перетворень на шляху до кінцевого споживача. Наприклад, у країнах Європейського Союзу, об'єм генерованої електрики уже покриває потреби, які традиційно забезпечували за рахунок викопного вугілля. Такого рівня заміщення вдається досягнути як за рахунок підвищення коефіцієнта корисної дії сонячних панелей, так і організаційними заходами з мінімізації непродуктивних втрат фотоелектрики на шляху до кінцевого споживача.

У той же час, стихійний характер комплектування сонячними панелями різноманітного типорозміру, одиничної потужності, ширини спектрального і температурного діапазонів, поступової деградації (зношення) обладнання тощо не сприяє зростаючим вимогам з надійності електропостачання. Найперше це відноситься до підвищення ефективності роботи фотоелектричних установок протягом усього дня у режимі з часто непрогнозованими режимами інсоляції та відбору генерованої потужності. Відхилення реальних експлуатаційних характеристик фотопанелей від їх паспортних значень безпосередньо виявляють при закономірних змінах кутів освітлення, співвідношення потоків сонячної енергії та інтегральної інтенсивності сонячних спектрів у залежності від години дня. Відтак, для підвищення ефективності та надійності діючих фотоелектричних установок потрібно постійний моніторинг вхідного потоку сонячної енергії до фотопанелі і його порівняння з вихідною електричною потужністю, які зазвичай важко розрахувати теоретично.

Розділ 1 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ПРОТЯГОМ ДНЯ

1.1 Показники ефективності сонячних панелей

Дефіцит Україні в генеруючих потужностях частково покривається великим парком фотоелектричних панелей різної одиничної потужності енергетичної ефективності, спектральної чутливості, зношеності, адаптації до кліматичних умов тощо. Їх зведення навіть в одну енергетичну установку великої потужності завжди ускладнене додатковою процедурою електричного узгодження з неминучим непродуктивним втратами порівняно дорогої фотоелектрики.

Протягом дня умови інсоляції поступово змінюються з кутом освітлення фотопанелі, спектрального складу сонячних променів, та залежного від цих величин коефіцієнта пропускання скляного покриття, температури корпусу чи випадкових погодозалежних відхилень. Їх врахування та виключення з масиву вимірних даних генерованої потужності фотоструму, можливе лише за умови постійного моніторингу потоків сонячної енергії та фотомодуля, наприклад піранометром з напівсферичним оглядом небосхилу. Останній належить попередньо градуювати, бо його покази змінюються нелінійно з відхиленням Сонця від зеніту, тобто години доби [1]. Відтак достовірність вимірних на виході значень поточної потужності чи погодинної або денної продуктивності найперше залежить від засобів вимірювання інтенсивності потоку сонячної енергії до поверхні фотомодуля. Але стандартну методику калібрування піранометрів протягом дня на практиці використовують вкрай рідко, бо вона зазвичай відноситься до зенітного відхилення Сонця близького $\theta_z \approx 45^\circ$ [2].

Матеріали, запозичені з інших суміжних наукових напрямків часто ілюструють залежностями від таких величин, як зенітний кут, атмосферна маса, поточні координати Сонця та орієнтації сприймаючої поверхні, які у кінцевому підсумку є однозначними функціями часу (години доби). Тоді як користувачів

сонячних енергетичних установок найперше цікавлять саме часові залежності робочих характеристик, у тому числі вихідної потужності. Енергетичні перетворення вздовж ланцюжка послідовних перетворень променистої енергії в електричну на практиці вдається оптимізувати за експериментально встановленими або теоретично доведеними часовими кореляціями вихідних показників сонячних панелей з окремими вхідними, за допомогою відповідних рівнянь зв'язку.

Через складність процесів перетворення сонячної енергії в електричну всередині сонячних елементів, їх вихідну потужність фотомодуля зазвичай не розраховують, а вимірюють безпосередньо. Результати обох вимірювань в реальних умовах експлуатації – потоків сонячної енергії і вихідної потужності часто потрібно коригувати відповідними методичними прийомами. А ефективність сонячних елементів та панелей протягом дня, крім вольт-амперних та вольтватних характеристик, додатково характеризують ще такими енергетичними параметрами:

– годинною I і денною H експозиціями у Вт·год відповідно, а за триваліші періоди – місяць або рік $H_m = \sum H$ та $H_p = \sum H_m$;

– динамікою надходження променистої енергії, тобто зростання енергетичної експозиції опромінюваної поверхні фотомодуля протягом дня місяця або року. Останню описують зростаючою сумою годинних експозиції від сходу до заходу Сонця, з першого до останнього дня місяця або року. Графічно її ілюструють залежними від години дня S -подібними кривими, які в математичній статистиці та актинометрії називають кумулятивними функціями, а у фотометрії, наприклад – сенситометричними кривими почорніння плівки тощо (рис. 1.1).

Поточна потужність і годинна продуктивність енергетичної установки пропорційна кутовому коефіцієнту дотичної до кривої накопичення, а денна продуктивність – площі під нею. Подібно до прогнозів погоди, за кумулятивними кривими зручно прогнозувати продуктивність

фотоелектричних установок. Відповідні актинометричні прилади реєстрації енергетичних експозицій називають інтеграторами, а середньоденні значення публікують у доступній довідниковій літературі з метеорології [4], або більш сучасних електронних базах даних актинометричних величин [5].

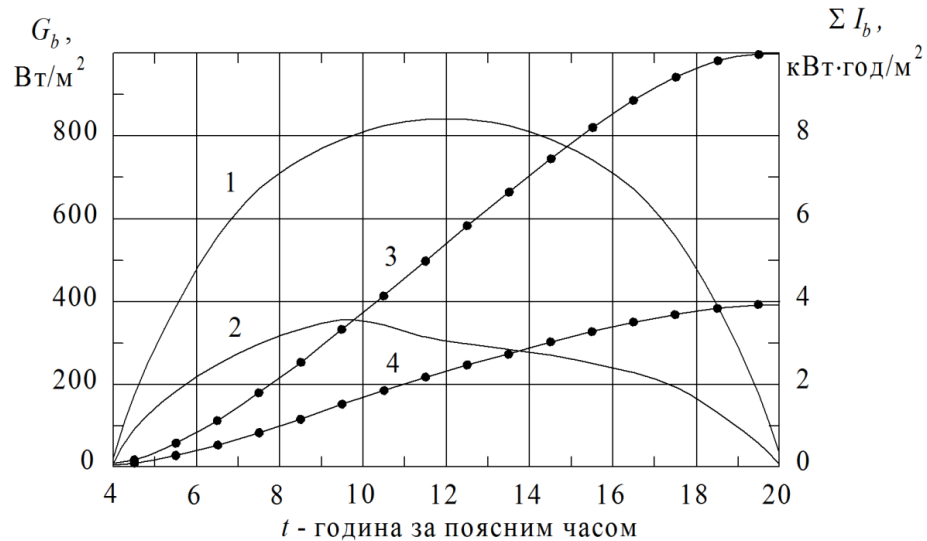


Рисунок 1.1 – Зміна інтенсивності прямої радіації (1 – за ясного неба; 2 – за середньої хмарності) та відповідні їм криві енергетичної експозиції [3]

1.2 Оптичні втрати у скляному покритті сонячних елементів

Фізичний зміст процесів фотоелектричного перетворення найчастіше ілюструють схемою пошарової конструкції, подібною до наведеної на рис. 1.2.

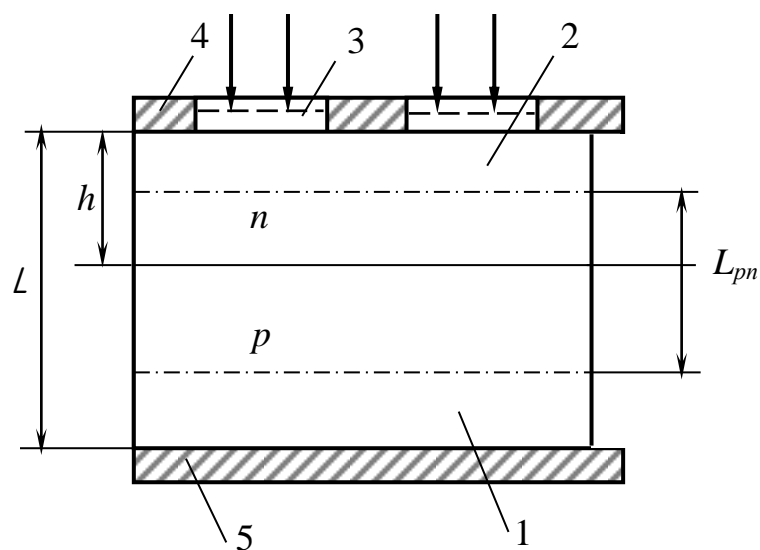


Рисунок 1.2 – Схематична будова планарного сонячного елемента

Шар 1 з напівпровідника p -типу, покритий тонкою кристалічною пластинкою кремнію n -типу 2, поверх якої нанесено металеві смужки 4 для відводу фотоструму. Планарна конструкція герметизована полімерною плівкою просвітлюючого шару 3 для ефективного пропускання світла і зверху закінчується захисним скляним покриттям – на схемі не показаним. Натомість нижня поверхня напівпровідника p -типу покрита суцільним металевим контактом 5, також прикритого полімерною плівкою, а уся конструкція сонячного елемента зазвичай відповідає пошаровій укладці шарів, наведеній на рис. 1.3).

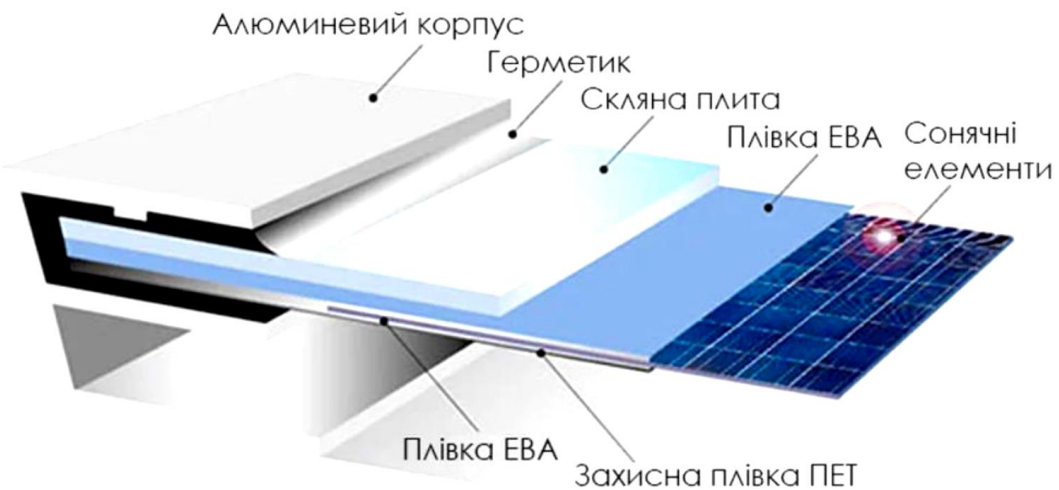


Рисунок 1.3 – Пошарова конструкція жорсткої сонячної панелі [6]

Проміжні прозорі покриття забезпечують захист напівпровідникових матеріалів від механічних пошкоджень та агресивних компонентів зовнішнього середовища тощо. Так само як і від зменшення неминучих оптичних втрат на усіх межах розділу шарів сонячного елемента внаслідок явищ відбивання, поглинання та пропускання за схемою просторового перерозподілу променів, наведеною на рис. 1.4).

У загальному випадку інтенсивність кожного потоку кількісно оцінюють коефіцієнтами, залежними від довжини хвилі світла λ : поглинання $\alpha(\lambda)$, пропускання $\tau(\lambda)$ і відбивання $\rho(\lambda)$, рівними відношенню їх інтенсивностей:

$$\alpha = \frac{I_{\text{погл}}}{I_{\text{пад}}} = \frac{I_{\alpha}}{I_0}; \quad \rho = \frac{I_{\rho}}{I_0}; \quad \tau = \frac{I_{\tau}}{I_0}. \quad (1.1)$$

Згідно до закону збереження енергії виконується таке співвідношення між потоками та відповідними їм коефіцієнтами:

$$I_{\alpha} + I_{\rho} + I_{\tau} = I_0; \quad \alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = \alpha + \rho + \tau = 1. \quad (1.2)$$

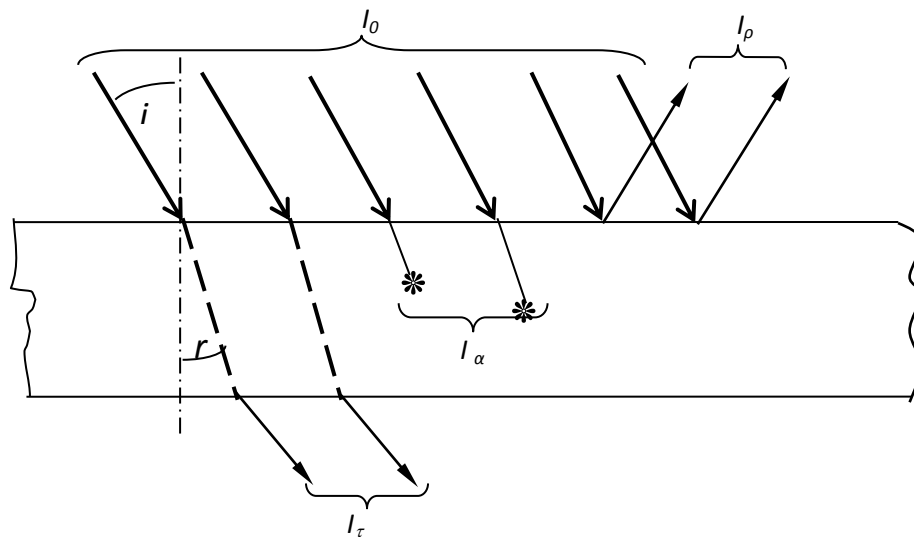


Рисунок 1.4 – Схема проходження сонячного променя через прозору пластинку та розподілу інтенсивності: I_0 – падаючої; I_{ρ} – відбитої; I_{α} – поглинутої; I_{τ} – пропущеної [7]

Коефіцієнт відбивання ρ зростає з кутом освітлення і мінімальним значення за нормального падіння променів, яке розраховують через показник заломлення n :

$$\rho = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2. \quad (1.3)$$

Для скла з показником заломлення $n = 1,5$ коефіцієнт відбивання $\rho = 0,04$, що відповідає зменшенню інтенсивності первинного променя на 4%. Натомість при великих кутах освітлення $\theta \approx 80^{\circ}$, коефіцієнт відбивання скла зростає до 0,5 і

його поверхня пропускає всередину лише половину падаючої потоку сонячної енергії .

Пропущений всередину матеріалу промінь (рис. 1.4) розповсюджується в об'ємі прозорого матеріалу під кутом заломлення r , який розраховують через кут падіння i та показник заломлення n за відомим із курсу фізики співвідношенням:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n \quad (1.4)$$

У випадку скісного освітлення поверхні сонячного елемента, коефіцієнт відбивання є складною функцією кута падіння, який, врахуванням зміни позначення $i \rightarrow \theta$, розраховують за формулою [7]:

$$\rho(\theta) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta - r)}{\sin^2(\theta + r)} + \frac{\text{tg}^2(\theta - r)}{\text{tg}^2(\theta + r)} \right] \quad (1.5)$$

Відтак, внаслідок поверхневого відбивання, скляне покриття пропускає всередину сонячного елемента лише частку енергії прямого потоку G_τ , залежну від кута освітлення та показника заломлення, рис. 1.4:

$$G_\tau = G(\theta, \rho_{\text{ск}}) = (G_b - \rho_{\text{ск}} G_b) \cos \theta = G_b (1 - \rho_{\text{ск}}) \cos \theta \quad (1.6)$$

Коефіцієнт пропускання багатошарового покриття зменшується відповідно кількості шарів та меж розділу між ними, як показано на рис. 1.5.

Просторовий (кутовий) розподіл відбитих променів змінюється ще з довжиною хвилі і станом поверхні, що значно ускладнює стандартну методику оцінки інтенсивності відбитого потоку сонячної енергії і кількості його шарів. Відтак порівняльний аналіз ефективності різних фотомодулів простіше виконати порівнянням фотострумів короткого замикання, використовуючи їх пропорційність інтенсивності пропущеного всередину потоку сонячної енергії:

$$I_{\text{кз}}(\theta) = 0,97k(\theta) G_b, \quad (1.7)$$

де: множник 0,97 – частка спектру енергії сонячних променів у межах прозорості скала; k – коефіцієнт пропорційності перетворення світлової енергії у фотострум.

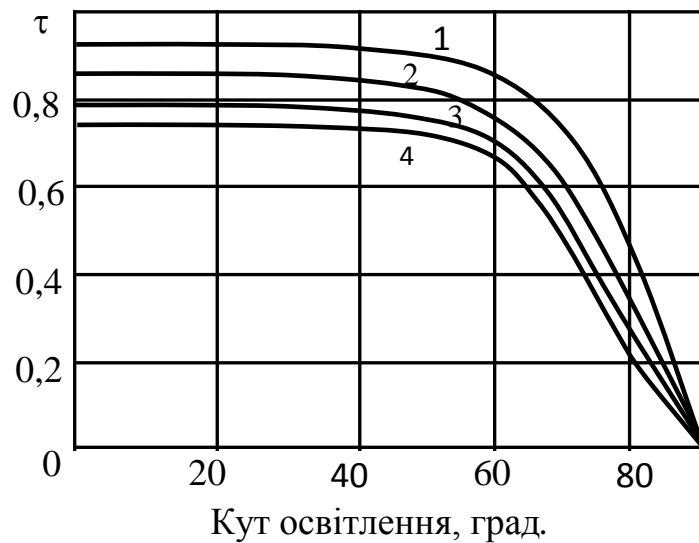


Рисунок 1.5 – Пропускна здатність багат шарового скляного покриття [7]

Таким чином оцінка ефективності фотоелектричного перетворення або енергетичного к.к.д. фотомодуля технічно зводиться до графічного порівняння двох залежностей фотоструму короткого замикання від кута освітлення при сталому значення інтенсивності потоку сонячної енергії G_b , нормального до площини фотомодуля.

Зокрема при нормальному куті освітлення $\theta = 0$, $\cos\theta = 1$ та за коефіцієнта відбивання для гладкої поверхні $\rho_{ск}(0)=0,04$, інтенсивність пропущеного всередину променя G_{br} і фотострум $I_{кз}(0)$ короткого замикання відповідно рівні

$$G_{br}(0) = [1 - \rho(0)] G_b \cos 0 = 0,97G_b \quad (1.8)$$

$$I_{кз}(0) = kG_b[1 - \rho(0)] = 0,97kG_b, \quad (1.9)$$

Фотоелектричні панелі зазвичай встановлюють під оптимальним кутом до площини горизонту і скеровують у південному напрямку. Їх кут освітлення протягом дня постійно змінюються з відповідно зміною енергетичної освітленості, поточної потужності та денної продуктивності. Порівнянням графіків зміни фотоструму зручно оцінювати відносну ефективність фотомодулів залежно від стану їх поверхні при однакових значеннях кута освітлення і сталих координатах Сонця на небосхилі.

1.3 Мінімізація оптичних втрат на межі розділу прозорих покриттів

Основним методом зменшення втрат сонячної енергії на відбивання, є профілювання поверхні скляного покриття об'ємними фігурами, наприклад у формі пірамідок мікронних розмірів, наведених на рис. 1.6. Хоч на їх гранях усі сонячні промені падають скісно, але відбиті переважно поглинаються сусідніми пірамідками. Власне відбивання поверхнею чистого кремнію становить понад 30% через його високий показник заломлення.

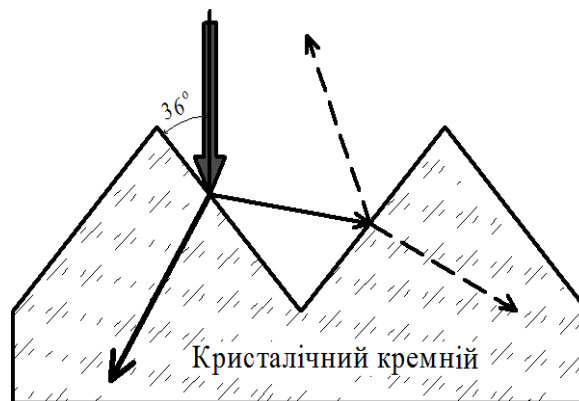


Рисунок 1.6 – Дисперсія сонячних променів на призматичних гранях профільованої поверхні

Перший заломлений промінь походить всередину скляного покриття, частина якого виходить назовні через основу сусідньої піраміди, а інша – завдяки внутрішньому відбиванню та багатократним повторенням процесів поділу – розсіюється в обох напрямках. Саме тому вранці та ввечері, за великих кутів освітлення, втрати інтенсивності істотно зростають за рахунок поверхневого відбивання I_p , послаблення I_α і подовження шляху всередині скла.

У фотомодулі існують ще дві межі розділу оптичних середовищ між захисним скляним покриттям та фоточутливим шаром напівпровідника у вигляді полімерної плівки EVA. Завдяки однаковим значенням показників заломлення захисного скла і плівки EVA, напрям та інтенсивність сонячних променів на межі їх розділу ними практично не змінюються. Натомість показник заломлення кремнію зано вищий, тому його поверхню з боку проміжної

плівки також текстурують. Еластична плівка заповнює поверхневі нерівності (впадини) для запобігання утворенню повітряних порожнин (рис. 1.7).

За різним даним, текстурування поверхні скла ефективно зменшує втрати на відбивання від 11 до 35%. Подібним чином профілюють і поверхню напівпровідникового шару з боку скляного покриття через проміжну еластичну плівку EVA (рис. 1.7), яка заповнює усі мікроскопічні порожнини та вичавлює з них повітря.

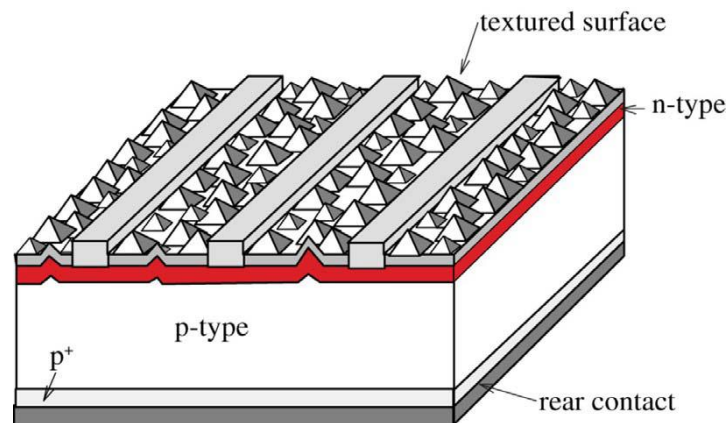


Рисунок 1.7 – Текстурування поверхні активного шару сонячного елемента [6,8]

Основні заходи зменшення оптичних втрат у сонячних елементах зводяться до наступних конструктивних рішень і технологічних прийомів:

- Верхнє контактне покриття поверхні елемента може бути мінімізовано (хоча це може призвести до збільшення послідовного опору $R_{\text{п}}$ заступної електричної схеми фотомодуля).
- На вхідній поверхні елемента можуть використовуватися додаткові анти рефлексні покриття (плівки анти відблиску), переважно селективні (рис. 1.8).
- Відбивання можна зменшити шляхом текстурування чи профілювання поверхні скляного покриття.
- Напівпровідниковий шар можна потовщувати з метою збільшення поглинання (хоча світло, яке поглинається на відстані, що перевищує довжину дифузії від

переходу, має низьку ймовірність збору і не сприятиме виникненню струму короткого замикання).

- Довжину оптичного шляху в сонячному елементі можна зменшити за рахунок поєднання текстурування поверхні з технологіями поглинання світла.
- Для зменшення інтенсивності відбитих променів часто використовують так звані анти рефлексні та просвітлюючі покриття плівками селективно поглинаючих окислів.

Селективне поглинання виникає завдяки інтерференції відбитих в одному напрямі промені, які взаємно гасяться з мінімізацією яскравості відображення тильної поверхні лицьовій та уникнення часткового засліплення оператора (рис. 1.8). Тоді як всередину сонячного елемента ця частина потоку променів не проходить і не бере участі у генерації фотоструму.

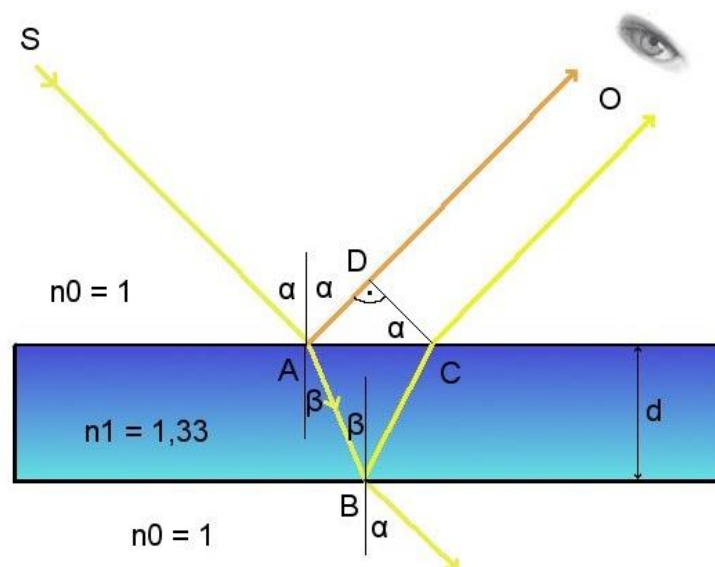


Рисунок 1.8 – Інтерференція відбитих променів тонкими плівками [9]

Товщину d_1 такого покриття з показником заломлення n_1 і світла, що падає на покриття з довжиною хвилі вільного простору λ_0 , яка викликає мінімальне відбиття, розраховується за формулою:

$$d_1 = \lambda_0 / 4n_1 \quad (2.10)$$

Зокрема при нормальному куті освітлення θ визначають кути заломлення r_1 , r_2 і t ві θ . Навколишня область має показник заломлення n_0 , ARC має показник

заломлення n_1 і товщину t_1 , а кремній має показник заломлення n_2 , хоч насправді у кремнію та його покритті показники заломлення є функцією довжини хвилі

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}; \quad r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}; \quad \theta = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \quad (2.11)$$



Рисунок 1.9 – Селективне просвітлення спектру відбивання в області максимальної чутливості сонячних елементів [9]

Усі три співвідношення можна пов'язати таким загальним рівнянням

$$R = |r^2| = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\theta}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\theta} \quad (2.12)$$

Теоретично відбиття для даної товщини, показника заломлення та довжини хвилі можна зменшити до нуля за допомогою наведених вище рівнянь, показник заломлення залежить від довжини хвилі, тому нульове відбиття виникає тільки на одній довжині хвилі.

На відміну від антиблікових оптичних приладів, покриття на сонячних батареях виготовляють з тонких шарів діелектричних матеріалів, товщиною, кратною довжині чверті хвилі, для зміщення фаз відбитих зовнішньою і внутрішньою поверхнями покриття. Оскільки найбільша чутливість людського ока відповідає центральній частині видимої ділянки спектра з $\lambda = 555$ нм (див. рис. 1.9), товщину плівки здебільшого беруть рівною $1/4$ вказаної довжини хвилі. При цьому відбиття буде малим для зеленого і найбільшим для синьо-фіолетового та червоного світла. Натомість для фотоелектричних інсталяцій показник заломлення і товщину покриття вибирають такими, щоб мінімізувати відбивання хвиль довжиною 0,6 мкм, близьких до області пікової потужності сонячного спектра (рис. 1.10).

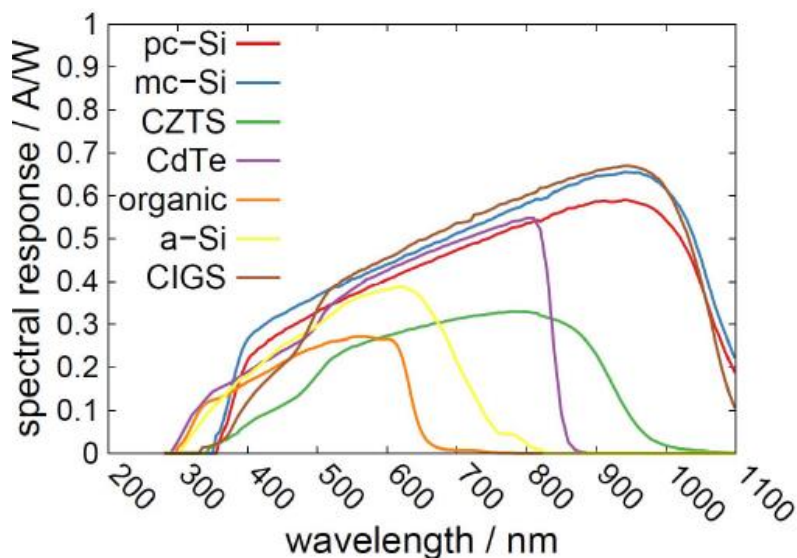


Рисунок 1.10 – Інтервали спектральної чутливості напівпровідникових матеріалів [10]

Поверхня чистого кремнію відбиває понад 30%, яке традиційно зменшують текстурування і нанесенням на поверхню антиблікових покриттів (ARC). Натомість подвійні просвітлюючі покриття з окислів $\text{SiO}_2 / \text{TiO}_2$, які наносять на поверхню ФЕП методом високочастотного розпилення. У випадку не текстуrowаного ФЕП на основі монокристалічного кремнію з орієнтацією

таке покриття підвищує ефективність генерації на 37 % за рахунок мінімізації значення інтенсивності до близько 2,3% на довжині хвилі 630 нм з середнім коефіцієнтом відбивання 7% в інтервалі довжин хвиль 400-1000 нм. Таким чином, як стверджується у літературі, подвійний шар $\text{SiO}_2 / \text{TiO}_2$ характеризується високою абсорбційної здатністю і тому його вважають перспективним матеріалом для підвищення ефективності ФЕП [8, 10].

Захисне скло поглинає більшу частину світла короткохвильової частини спектру, менших за 400 нм, де відгук дуже слабкий, тоді як на проміжних довжинах – наближається до ідеального, а у довгохвильовій області – швидко спадає до нуля, що показано на рис. 1.11.

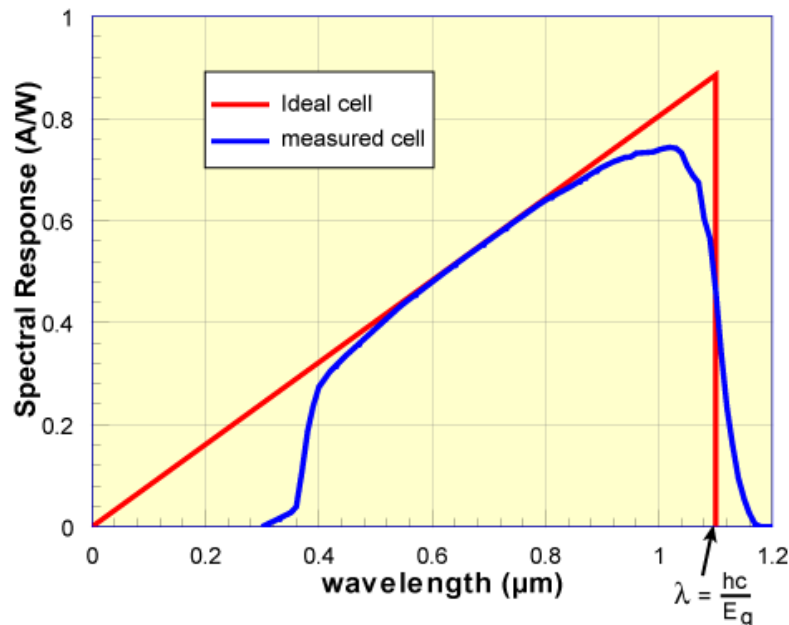


Рисунок 1.1 – Ідеалізований графік спектрального відгуку кремнієвого сонячного елемента з обмеженням короткохвильового краю скляним покриттям [9]

Розділ 2 ПРИРОДА НЕПРОДУКТИВНИХ ВТРАТ ФОТОМОДУЛЯ ПРОТЯГОМ ДНЯ

2.1 Режими інсоляції фотомодуля протягом дня

В ідеальному випадку усі промені чутливої області спектру мають бути поглинуті для розділення електронно-діркових пар з наступним генеруванням фотоструму відповідної електричної потужності. Основною причиною відносно низької ефективності сонячних елементів є значно вужчий діапазон їх чутливості відносно повної енергії сонячного спектру у межах довжин хвиль від 0,25 до 2,8 мкм. Рівень оптичні втрат зазвичай діагностують за зменшенням струму короткого замикання.

Сонячні панелі енергетичних установок зазвичай орієнтують у південному напрямку з оптимальним сезону кутом нахилу до площини горизонту. Протягом дня параметри інсоляції стаціонарного фотомодуля не залишаються сталими: неперервно змінюється кути освітлення $\theta(\tau)$, інтенсивність прямого $G_b(\tau)$ та повного $G_{т\beta}(\tau) = G_{д\beta}(\tau) + G_{р\beta}(\tau)$ потоків сонячної енергії та спектральний склад кожної складової, а також температура сонячних елементів, залежна, у свою чергу, як від освітленості фотомодуля $E = G_{т\beta}$, температури довкілля T_a чи швидкості вітру v на метеорологічній висоті 10 м.

Практичні прийоми оцінки поточної продуктивності сонячних панелей безпосередньо враховують природні значення означених вище інсоляційних величин. А протягом дня – за експериментальними визначеними часовими залежностями цих трьох основних вхідних величин, отриманих при умовах інсоляції при ясному небі. Але наведені у літературі результати досліджень, важко порівнювати між собою через їх неповну відповідність критеріям інсоляції при ясному небі, та їх просторово-часовим параметрам. Як приклад, на рис. 2.1, наведені часові залежності для первинних вхідних величин з не виправленими випадковими відхиленнями і без уточнення додаткових даних

для їх приведення до загальноприйнятого типового вигляду, прийнятого для їх повторного відтворення або звірки результатів.

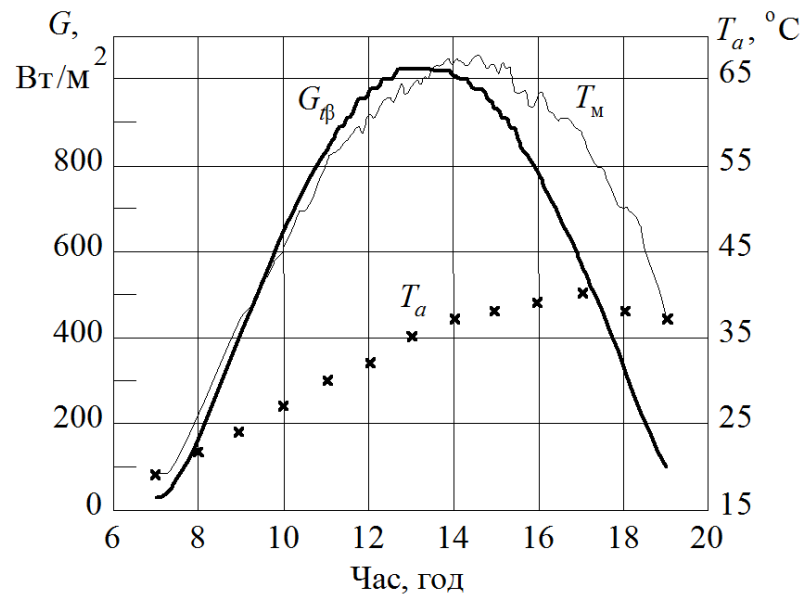


Рисунок 2.1 – Зміни параметрів довкілля протягом дня при ясному небі [11]

Насправді протягом дня приземний сонячний спектр поступово змінюється від розподілу з максимальною інтегральною інтенсивністю AM1 (відносна оптична маса атмосфери $m=1$), до AM37 (3) з мінімальною інтенсивністю. Одночасно відбувається зсув максимуму функції спектрального розподілу у довгохвильову область (рис. 2.2).

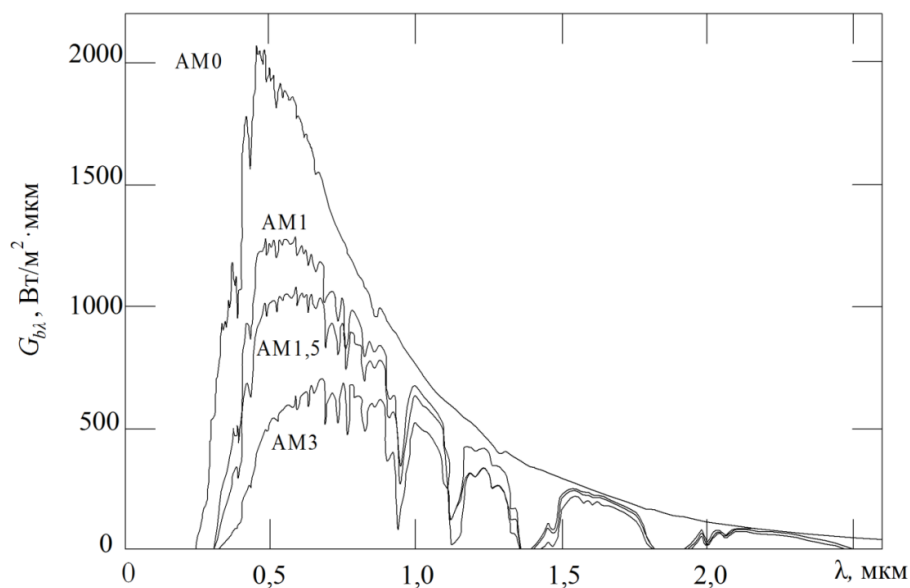


Рисунок 2.2 – Спектри прямих сонячних променів для субарктичного літнього повітря з вмістом водяної пари 1,42 г/м³ і висотою 23 км [12]

Сонячні панелі енергетичних установок зазвичай орієнтовані на південь (азимутальний кут $\gamma=0$) і нахилені під кутом β до горизонту, оптимальним для майданчика кожного сезону року. Відтак тривалість його освітлення завжди менша за тривалість сонячного сьйва, з відповідним скороченням шляху сонячних променів у атмосфері. Так само звужується й інтервал атмосферних мас для скісних променів – від мінімального $AM \geq 1$ до максимального у моменти сходу Сонця над модулем чи заходу за його площину.

Як відомо, стандартні значення енергетичної ефективності або ККД сонячних панелей, чисельно рівні відношенню їх поточної електричної потужності до енергетичної освітленості променями спектрального складу AM1.5. В реальних умовах ефективна освітленість сонячних панелей відбувається трьома потоками сонячної радіації неоднакового спектрального складу.

$$E = G_{t\beta} = G_{d\beta} + G_{r\beta} \quad (2.1)$$

Відтак їх фактичний ККД також слід розраховувати через відношення вихідної потужності до сумарної енергетичної освітленості усіма потоками сонячної радіації спектрального діапазону від 0,28 до 2,8 мкм, у якому зосереджено 97...98% сонячної енергії. Тоді як діапазон чутливості сучасних сонячних елементів значно вужчий і не змінюється, що на рис. 2.3 ілюстровано графічним порівнянням відповідних залежностей з трьома варіантами зміни сонячних спектрів протягом дня, запозичених з публікації [13].

З порівняння однозначно випливає, що так розраховані значення ККД у полудень, після сходу і перед заходом Сонця будуть помітно відрізнятися. Цю обставину не враховують діючі стандарти на випробування сонячних панелей та популярні практичні рекомендації з оцінки їх робочих характеристик, наприклад NOCT.

Як відомо, на величину фотоструму короткого замикання фотомодуля впливає насамперед інтенсивність потоків сонячних променів, та їх спектральний розподіл відносно області чутливості сонячних елементів. Обидві

ці величини залежні від стану атмосфери на віть за близького до наближення ясного неба: абсолютної маси повітря, скрапленої вологи, каламутності, хмар, пилу, диму, інших аерозолей, альbedo землі тощо.

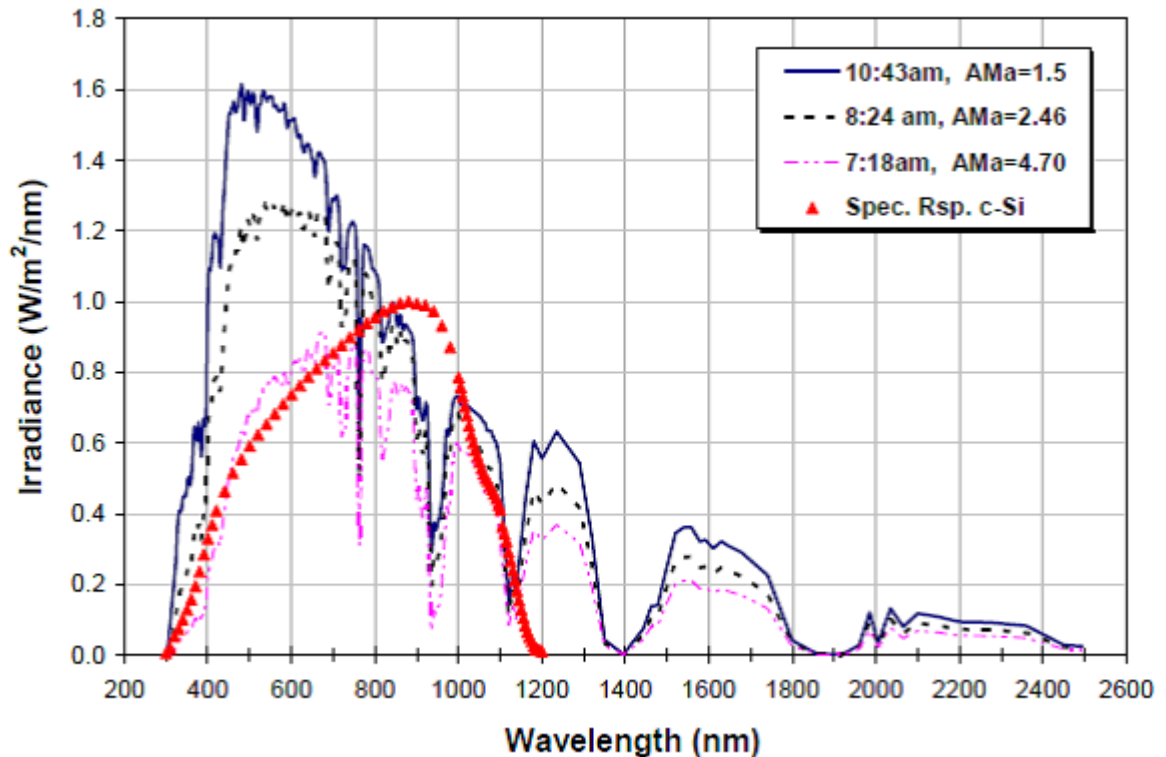


Рисунок 2.3 – Порівняння сонячних спектрів для трьох значень атмосферної маси з інтервалом чутливості кремнієвого сонячного елемента [13]

Однак реальний вплив перелічених факторів на поточну, добову або річну продуктивність фотоелектричної системи недостатньо вивчені. Тому результати тестування фотопанелей переважно узалежнюють [14], від атмосферної маси вздовж траєкторії променів, яку прийнято в одиницях відносної маси повітря m , рівної відношенню маси взовж променя $M(\tau)$ до маси у зенітному напрямку M_0 :

$$m = \frac{M(\tau)}{M_0} \quad (2.2)$$

Поточний напрям та інтенсивність променів, відносну атмосферну масу m (інше позначення АМ), і кут освітлення фотомоуля θ , у свою чергу, прийнято

розраховувати через кутове відхилення Сонця від зеніту θ_z . Так само й вплив зміни сонячного спектру на струми короткого замикання $I_{кз}$ протягом дня можна звести лише до залежності від повітряної маси на або години дня. (див. рис. 2.4).

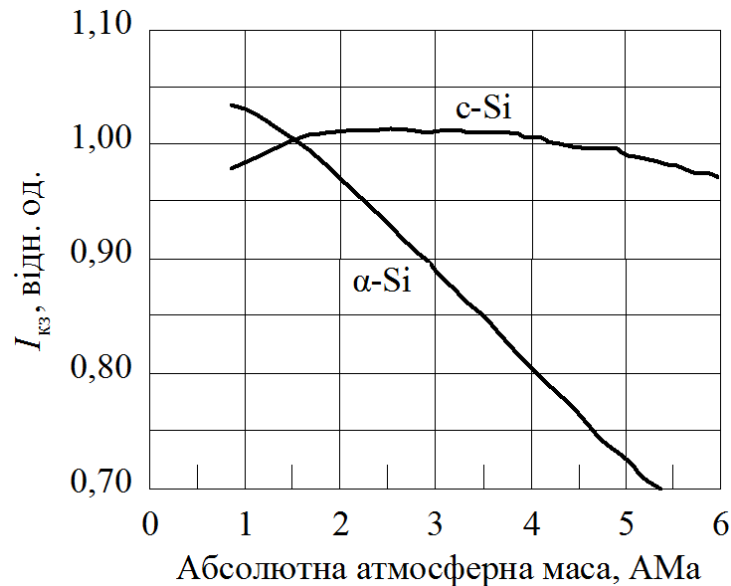


Рисунок 2.4 – Зміна $I_{кз}$, фотомодуля протягом дня, узалежнена від АМ [13]

Значення $I_{кз}$ на цьому рисунку запозиченні з публікації [13], були виміряні піранометром Eppley PSP, розташованим поруч із модулем, та переведено до значення при 50°C і нормалізовано до 1000 Вт/м^2 . Окремий від фотомодуля детектор піранометра Епплі забезпечує спектрально незалежне вимірювання повного сонячного опромінення E .

2.2 Наближення ясного неба

Робочі характеристики сонячних панелей в енергетичних інсталяціях природніше узалежнювати від години дня, замість прийнятої в актинометрії та метеорології оптичної маси повітря m вздовж сонячних променів. Для цього у сонячній енергетиці використовують поняття наближення ясного неба – прозорого стану атмосфери за відсутності хмар, мінімальної концентрації скрапленої водяної пари та аерозолей різного походження. Поступове ослаблення інтенсивності сонячних променів вздовж їх траєкторії описують

наближеними аналітичними співвідношеннями, які моделюють основні фактори взаємодії радіаційних потоків з компонентами атмосферного повітря. Так, адаптована до кліматичних умов України модель ясного неба, розроблена в Європейському Атласі сонячної радіації (ESRA) [15-17], пропонує таке співвідношення для розрахунку оцінки приземних потоків сонячної енергії:

$$G_b = G_{sn} e^{-0,8662 \cdot m \cdot \delta_R(m) \cdot T_{LK}(AM2)} \quad (2.3)$$

Там проміжною величиною вжито атмосферну масу, залежну від години дня опосередковано – через кут зенітного відхилення Сонця, $\theta_z(\tau)$

$$\cos \theta_z(\tau) = \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \tau + \sin \varphi \cdot \sin \delta \quad (2.4)$$

де: τ – локальний сонячний час, відрахований відносно полудня – моменту навищої кульмінції Сонця; φ – географічна широта майданчика, град; δ – сонячне схилення станом а поточний день року з порядковим номером n ; $\omega = 15$ град/год – кутова швидкість обертання земної кулі навколо власної осі. Відтак

$$m = \frac{\exp\left(-\frac{z}{8334,5}\right)}{\cos \theta_z + 0,50572 \times (96,07995 - \theta_z)^{-1,6354}} \quad (2.5)$$

де z – висота майданчика над рівнем моря у метрах.

Множник δ_R у показнику експоненти відображає так звану оптичну густину Релеївської (ідеальної, сухої та чистої) атмосфери у вертикальному напрямку ($m=1$), а добуток $m\delta_R$ – оптичну товщину атмосфери у скісних напрямках. Натомість інший множник – фактор Лінке $T_{LK}(AM2)$ – характеризує ступень каламутності повітря від не газових компонентів. Кількісно його визначають як частку від загального послаблення сонячної енергії: G_{sn} – на вході у земну атмосферу до інтенсивності на поверхні наземного приймача G_b . Такому стану у метеорологічних базах даних з актинометрії, найближче відповідають таблично задані усереднені значення інтенсивності потоків сонячної радіації при ясному небі, з якими порівнюють результати моделювання за формулою (2.3) [3, 4].

Поточний кут освітлення фотопанелі довільної орієнтації відносно сторін світу і постійно нахиленої до площини горизонту під кутом β :

$$\cos\theta(\tau) = \cos\theta_z(\tau) \cdot \cos\beta + \sin\theta_z(\tau) \cdot \sin\beta \cdot \cos[\gamma_s(\tau) - \gamma]. \quad (2.6)$$

де: γ і $\gamma_s(\tau)$ – кути відхилення горизонтальних проєкцій нормалі ФМ та сонячного променя від південного напрямку, який для Сонця у полудень та стаціонарної фотопанелі зазвичай рівні нулю. Кут відхилення проєкції сонячного променя на горизонтальну поверхню γ_s , розраховують за формулою:

$$\cos\gamma_s = \left(\frac{\cos\theta_z \sin\varphi - \sin\delta}{\sin\theta_z \cos\varphi} \right) \quad (2.7)$$

Розраховані відповідно моделі ESRA криві денного розподілу інтенсивності часових інтенсивності сонячних променів мають ряд переваг перед вимірними безпосередньо (див. рис. 2.5). Бо замість випадкових погодозадежних відхлень відображають значно менші їх усереднені значення, а самі криві легко відтворити для будь-якого дня року та географічних координат місцевості (див. ілюстрацію на рис. 2.6).

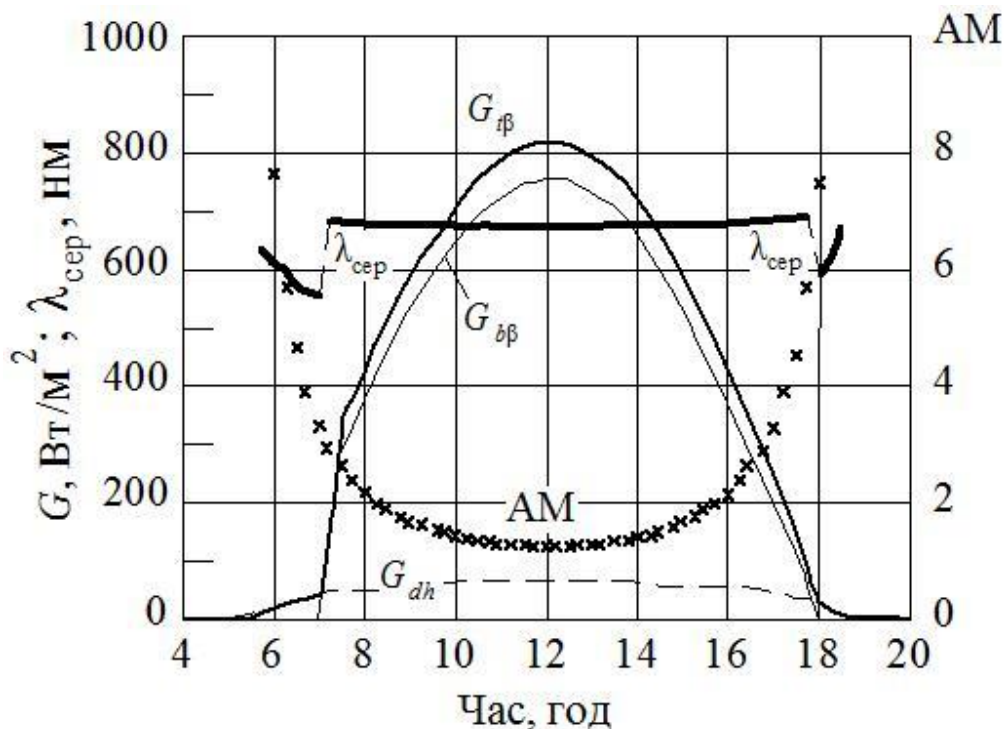


Рисунок 2.5 – Закономірні зміни інсоляційних величин при ясному небі з короткочасним ранковим затіненням [18].

При використанні таблично заданих вхідних величин, амплітуди усереднених відхилень у формулі (2.3) легко виправити зміною відповідної частини значень масиву фактора мутності. Відтак і порівнювати результати роботи сонячних незалежно працюючих (віддалених у просторі і часі) енергетичних установок.

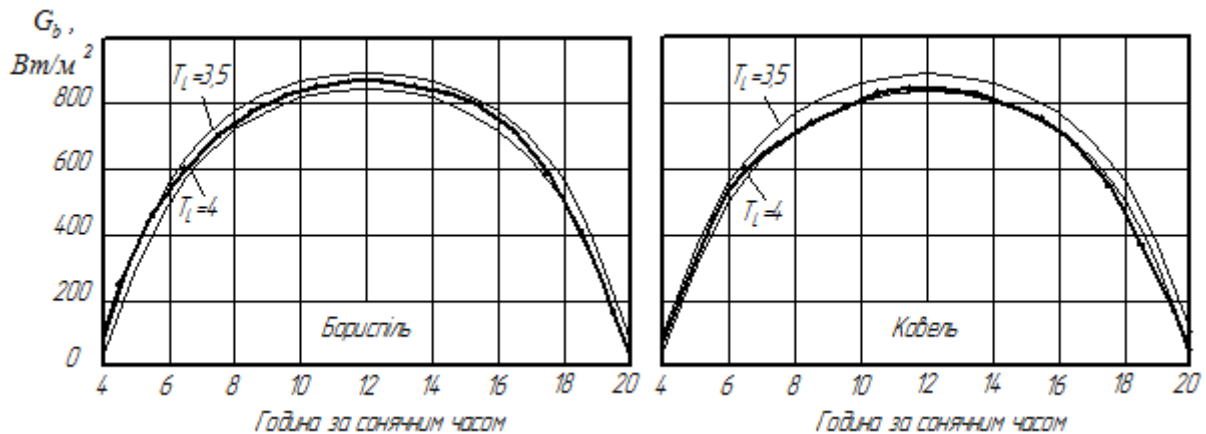


Рисунок 2.6 – Регіональна асиметрія усереднених залежностей $G_b(t)$ у порівнянні з їх ідеалізованими денними розподілом [3]

Рзглянута вище методики моделювання не передбачає врахування спектральної зміни денного розподілу сонячної енергії. На її важливості для оцінки об'єктивної оцінки ефективності роботи наголошується ще у ранніх у публікаціях Sandia National Laboratories США [13-15]. Там зроблено висновок про нехтовно малу похибку в обчисленнях денної продуктивності сонячних панелей (меншу за 3%), освітленого спектром АМ3. За оцінками, наведеними у [14], це відповідає максимальному зенітному відхиленню зенітного кута до 70° та 10-годинному інтервалу освітлення нормальної до променів поверхні прямим потоком сонячної енергії. Пізніших результатів з іншою оцінкою похибки розрахунку поза межами цього інтервалу, нами не виявлено. Таким чином ігноруються внески у денну продуктивність 2...3 годинних інтервалів сонячного сьйва відразу після сходу Сонця і перед його заходом.

Відтак користувачам залишається самостійно розробити методику такого дослідження з врахуванням можливостей і технічних характеристик наявного

обладнання. Зокрема, з метою оперативного керування поточним режимами роботи сонячних панелей та підвищення їх денної продуктивності потрібно попередньо оцінювати зміни параметрів сонячних панелей при сталих та змінних значеннях трьох вхідних величин – освітленості, температури і спектрального складу променів.

2.3 Реальні режими інсоляції фотомодуля протягом дня та методика вимірювання параметрів його ефективності

Зважаючи на високу ймовірність відхилення природної освітленості та обох температур, поточні значення $I_{кз}$ та $U_{рк}$, а також максимальної електричної потужності $P_{трр}$ на виході фотомодуля, ці величин потрібно вимірювати протягом короткочасних інтервалів стабільності зовнішніх факторів. Такі умови зазвичай реалізуються за стану ясного неба, при якому режими інсоляції протягом дня змінюються практично закономірно, відповідно поточним координатам Сонця на небі та локальним обмеженням.

Ефективність роботи сонячних панелей у складі фотоелектричних установок на практиці оцінюють за методиками, які ґрунтуються на експериментально виявлених закономірностях, відображених у стандарті НОСТ:

- фотострум короткого замикання $I_{кз}$ змінюється з часом пропорційно енергетичній освітленості фотомодуля сумарним потоком сонячної енергії $G_{тв}$;
- напруга розімкненого кола $U_{рк}$ (холостого ходу $U_{хх}$) змінюється з часом прямо пропорційно пропорційна температурі сонячних елементів (фотомодуля) T_m .

Верхня і нижня межі зміни цих величин зазвичай уточнюються окремо відповідно умовам експлуатації. Як було з'ясовано вище, втрати поточної потужності і продуктивності сонячних панелей протягом дня відбуваються за рахунок таких природних факторів та конструктивних рішень:

- втрат частини енергії сонячних променів на поверхні скляного покриття через його забруднення або надмірне відбивання;
 - природне зменшення освітленості та тривалості інсоляції стаціонарних поверхні фотопанелей зранку і надвечір відносно режиму стеження за Сонцем;
 - зміни спектрального розподілу потоків сонячної енергії протягом дня та особливостей спектральної чутливості напівпровідникових матеріалів.
- Користувачам фотоенергетичних установок важливо знати хоча б порівняльні оцінки впливу кожного з перелічених факторів для обґрунтування ефективних протидіючих заходів керування процесами генерації фотоелектрики.

Найпростіше оцінити вихідні характеристики фотопанелі у залежності від кута освітлення при натуральному освітленні потоками сонячної панелі незмінного спектрального складу. Дослідження можна реалізувати розміщенням фотопанелі на платформі полярно поворотного пристрою, з регульованим кутом відхилення опромінюваної поверхні від напрямку на умовно нерухоме полудневе Сонце. Термін «умовно нерухоме» означає, що тривалість реєстрації робочих характеристик набагато коротша за помітний вплив зміщення Сонця на параметри інсоляції.

Цієї умови найпростіше дотриматися при ясному небі, коли усі інсоляційні показники змінюються повільніше за вимірювальний цикл. Наприклад коли зміни сонячних координат та зенітного кута нехтовно малі протягом принаймі півгодинного вимірювального циклу, тому практично не впливають на енергетичну освітленість поверхні фотомодуля. Допустимим критерієм нестабільності інсоляції можна вважати похибку вимірювання інтенсивності потоків сонячної енергії стандартним піранометром у 3% [1].

Вимірювання можна проводити у натурних умовах, при незмінному спектральному складі потоків сонячної енергії. За наявності мало інерційних вимірювальних приладів оціночні значення легко звіряти з відповідними експлуатаційними характеристиками та виміряти більшість робочих характеристики фотоелектричних установок навіть за ручного перемикавання

кутах освітлення [19]. Відтак це відповідає завданню на кваліфікаційну роботу ОКР «Магістр» з оцінки ефективності фотомодулів протягом дня, за двома серіями опосередкованих вимірювань.

Зокрема вдається розрахувати найбільш ймовірні значення поточних параметрів інсоляції сонячних панелей, їх електричну потужність і денну продуктивність:

– залежності фотоструму короткого замикання та вихідної потужності від кута освітлення при сталому спектральному складі опромінення та висоти Сонця над горизонтом;

– залежності фотоструму короткого замикання та вихідної потужності стаціонарно нахиленого фотомодуля від спектрального складу сонячних променів, опосередковано залежного від його піднесення.

У випадку дуже прозорі (чистої та сухої) атмосфери дифузними потоками можна знехтувати, а енергетичну освітленість фотопанелі визначати за інтенсивністю прямих сонячних променів, коли кут освітлення рівний нулю. При цьому втрати на відбивання скляним покриттям з кутом освітлення слід порівнювати з відповідними змінами струмів короткого замикання $I_{кз}$. Результати порівняння повинні корелювати з переважаючим просторовим розподілом відбитого потоку сонячної енергії (див. рис. 2.7).

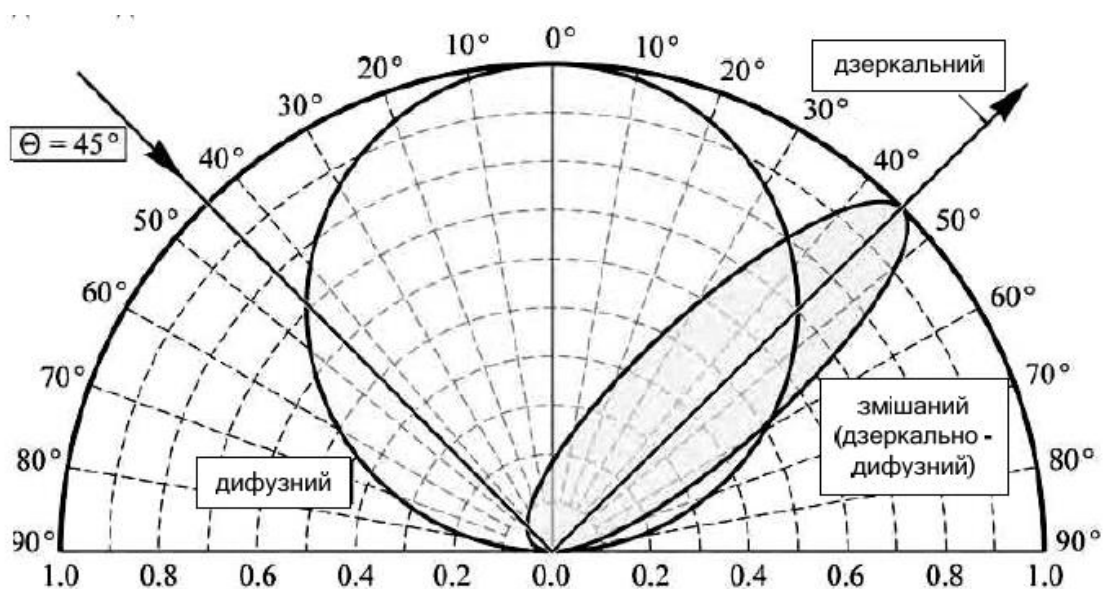


Рисунок 2.7 – Індикатриси відбивання променів плоскими поверхнями:

дзеркальною, матовою і частково запиленою

Для гладкої (не профільованої, не текстурованої) поверхні скла цю залежність освітлення описують формулою (1.5). Натомість шорсткі освітлені поверхні відбивають промені переважно дифузним потоком з просторовим розподілом косинусної залежності – максимальної інтенсивності у напрямі перпендикулярному відбиваючій поверхні та мінімальної – дотичних до поверхні. Відхилення від них вказує на поверхню з оптично неізотропним коефіцієнтом відбивання у переважаючих напрямках (рис. 2.3). Лінію, яка огинає кінці векторів, називають індикатрисою розсіювання.

Шорстка поверхня скляного покриття відбиває та випромінює у простір в усіх напрямках з дифузним розподілом інтенсивності подібним її тепловому випромінюванню (рис. 2.8).

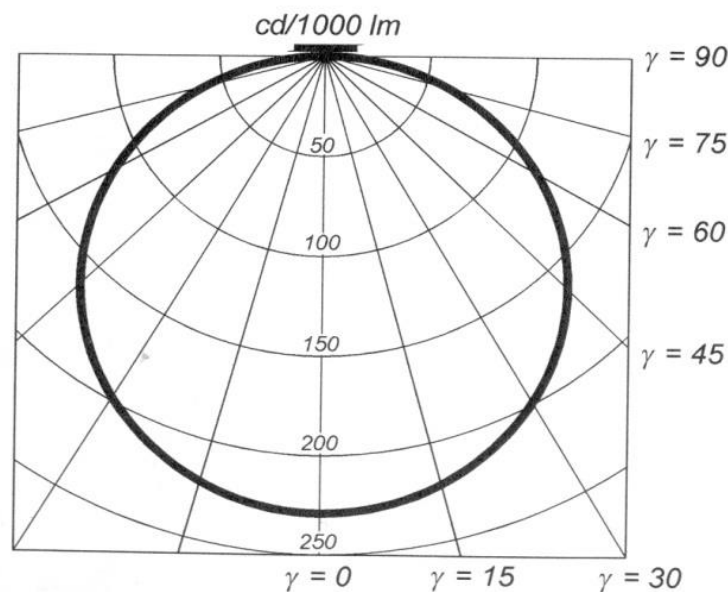


Рисунок 2.8 – Просторовий розподіл відбитих променів шорсткою поверхнею або крива сили світла (КСС) світної поверхні

На рис. 2.9 приведено типові КСС інтенсивності випромінювання плоскою поверхнею абсолютно чорного тіла побудованої у полярних

координатах (ліворуч). Близькі до неї властивості мають матові або шорсткі поверхні, а також скло. Тоді як поверхні звичайних матеріалів з різною шорсткістю поверхні випромінюють та відбивають з просторовим розподілом, наведеними на (рис. 2.9) ілюстраціями, запозиченими з навчальної літератури.

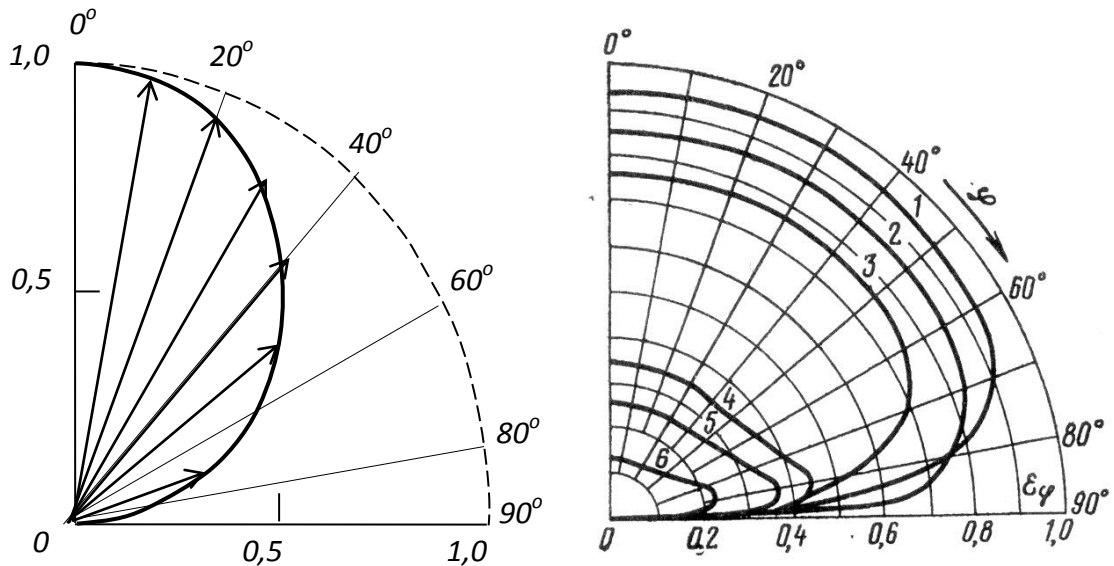


Рисунок 2.1 – Розподіл випромінювання та відбивання поверхнею абсолютно чорного тіла і скла (ліворуч) та шорсткими матеріалами (праворуч): 1 – дерево; 2 – корунд; 3 – окислена мідь; 4 – вісмут; 5 – алюмінієва бронза; 6 – латунь.

Розділ 3 РОЗРОБКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФОТОМОДУЛЯ

3.1 Пристрій зміни кутів освітлення протягом дня

Гладка поверхня прозорих матеріалів відбиває значну частину падаючих променів але так, що коефіцієнт відбивання ρ зростає зі збільшенням кута освітлення. Поверхня сучасних фотомодулів, як правило, оброблена текстуруванням, профілюванням, просвітленням у спектральному діапазоні або покрита анти рефлексними (антибліковими) плівками. Усі перелічені фактори послаблюють або відбиті поверхнею промені та спотворюють їх спектральний склад та кутовий розподіл.

Усі перелічені параметри відбитого потоку безпосередньо виміряти неможливо, відтак на практиці його інтенсивність оцінюють лише опосередковано – за інтенсивністю пропущеного покриттям світлового потоку. Опосередкованим індикатором енергії променів, пропущених всередину сонячних елементів, зазвичай використовують струм короткого замикання $I_{кз}$. Його поточне значення пропорційне інтенсивності тої частини пропущеного пучка, яка провзаємодіяла з напівпровідниковою структурою за механізмом внутрішнього фотоефекту. Ширина спектральної області взаємодії залежить від чутливості сонячних елементів до променів з певною довжиною хвилі (див. рис.1.9...1.12).

Обидві складові оптичних втрат протягом дня – відбитий поверхнею потік сонячних променів та зміну його спектрального складу через послаблення шару атмосферного повітря змінної товщини, пропонується оцінювати методом сканування інтенсивності вхідного потоку за допомогою полярно-поворотного пристрою стеження за Сонцем. Загальний вигляд такого лабораторного випробувального пристрою наведений на рис. 3.1. Він складається з горизонтальної опорної рами, з'єднаної двома опорами різної

висоти і нахилу з вузлами підвісу валу поворотної осі, нахиленої від кутом до горизонту φ , рівним географічній широті інсоляційного майданчика.



Рисунок 3.1 – Загальний вигляд полярно-поворотного пристрою стеження за Сонцем

Наведену конструкцію нами доповнено шарнірним вузлом кріплення ФМ до поворотної платформи для його відхилення від осі обертання на кут, рівний поточному значенню сонячного схилення δ_n (див. рис. 3.2) . Таке доповнення забезпечує оптимальний режим освітлення (кут падіння $\theta=0$) прямими сонячними променями протягом усього дня.

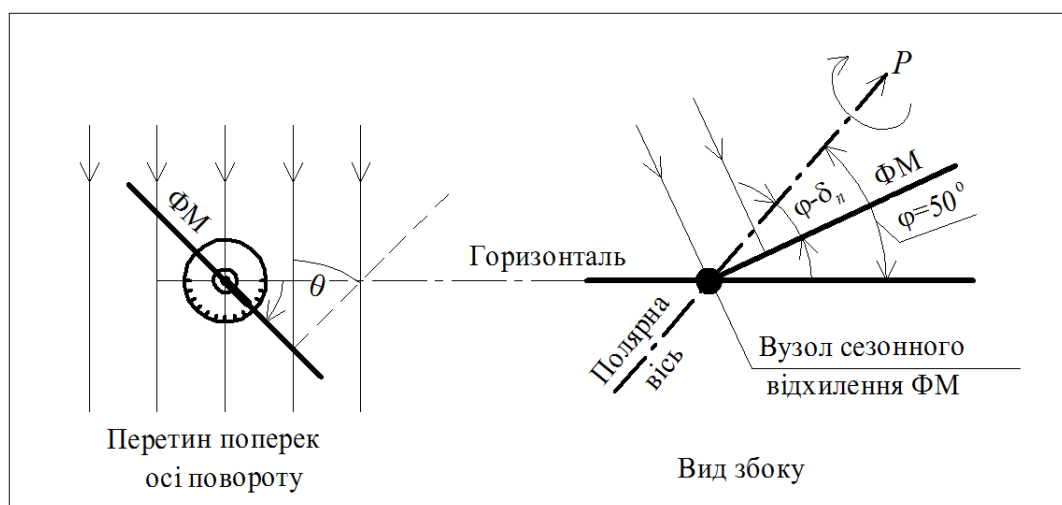


Рисунок 3.2 – Схема освітлення ФМ, відхиленої від осі полярно поворотного пристрою на сезонне значення сонячного схилення

Для дослідження залежності електричних параметрів фотомодуля від кута освітлення, весь трекер потрібно розвернути на 90° у горизонтальній площині. Ліву коротку стійку монтажної рами, разом з електроприводом, потрібно подовжити наростити так, щоб поворотна вісь стала горизонтальною.

3.2 Електрична схема і алгоритм керування кутовими відхиленнями

Алгоритм керування полярно поворотного пристрою стеження забезпечує синхронні (погодинні) кутові зміщення ФМ на 15° відносно початкового у полудень прийнятого на нуль. У площині сонячної траєкторії кути повороту розгортаються у такій послідовності: 0° ; 15° ; 30° ; 45° ; 60° ; 75° і 90° . При цьому доцільно скористатися шкалою локального сонячного часу з початком відліку від полудня, якому завжди відповідає нуль години.

Поточний цьому кут освітлення протягом дня рівним нулю, а кут нахилу до площини горизонту β зенітному θ_z , який розраховують за відомою формулою

$$\cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega \tau. \quad (3.1)$$

За такої послідовності усі обчислення та графічне представлення результатів зручно виконувати за апробованим алгоритмом табличного процесора середовища Excel, розробленого у лабораторії відновлюваної енергетики ЛНУП для обробки результатів вимірювання інсоляційних величин, і наведеної у монографії [3]

Для зручності представлення у масштабі стандартного листа А4 схему керування (рис. 3.4) складено з генератора часових сигналів, подільника частоти формувачів імпульсів керування, лічильника, дешифратора логічних елементів та виконавських пристроїв. Живлення автономне напругою 12 в. Хвилинні та годинні імпульси для команд керування формує верхня частина схеми на рис. 3.4, а блок їх виконання – правої. Зверху виділено два субблоки транзисторних ключів приводу повороту і реверсу.

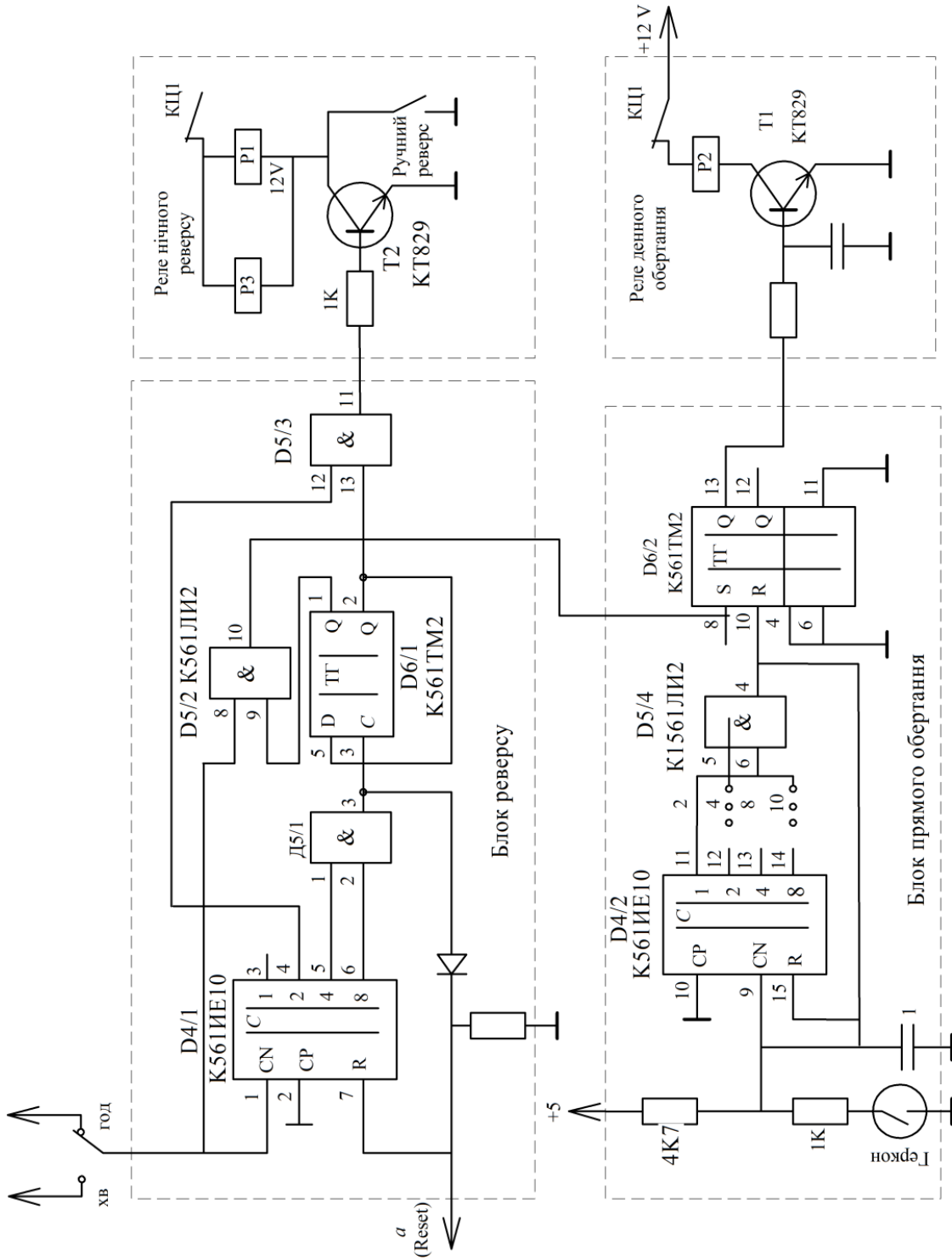


Рисунок 3.4 – Принципова схема блоків синхронного стеження за Сонцем полярно поворотного пристрою

Наведена на рис. 3.4 (ліворуч) частина схеми керування, генерує періодичні імпульси через рівні часові інтервали – годинні або хвилинні, реверсні для повернення у початковий стан після завершенні добового циклу та довільної тривалості для запуску пристрою посеред дня.

3.3 Особливі прийоми вимірювання та інтерпретації результатів

При ясному небі і високій прозорості атмосфери інтенсивність сонячних променів змінюється відповідно масі повітря вздовж променів, у тому числі й за рахунок спотворення їх спектрального складу (див. рис. 1.11 і 1.12). Атмосферну масу (АМ) зазвичай розраховують для через зенітний кут Сонця для будь-якої години дня упродовж року. Тоді як інтенсивність вхідного потоку неважко виміряти безпосередньо піранометром, чутлива поверхня якого орієнтованим паралельно площині фотомодуля. А за особливо прозорої атмосфери, денний розподіл інтенсивності потоку сонячної енергії можна розрахувати у наближенні моделі ясного неба, представленої у Європейському Атласі сонячної радіації (ESRA).

У ручному режимі сканування робочі характеристики фотомодуля реєструють приладами лабораторного стенду з дослідження вольт амперних характеристик сонячних панелей (рис. 3.5), побудований за принциповою схемою, наведеною на рис. 3.6. Перші вимірювання параметрів ефективності з кутом освітлення починають рівно у полудень, а усі наступні – через півгодинні або годинні інтервали. Кутову компоненту оптичних втрат на вході у фотомодуль оцінюють через поточний кут освітлення θ , пов'язаний відомим співвідношенням з доступними для користувача параметрами інсоляції – зенітним кутом θ_z , азимутами Сонця γ_s і освітленої ним площини γ [3]:

$$\cos\theta = \cos\theta_z \cos\beta + \sin\theta_z \sin\beta \cdot \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (3.2)$$

Початковий нахил фотомодулів обирають рівний zenітному відхиленню Сонця у момент полудня, яке під час літнього сонцестояння на широті $\varphi = 50^\circ$ рівне $\beta_{\tau=0} = \theta_{z \tau=0}$ станом 21 червня будуть

$$\theta_{z \tau=0} = 90^\circ - (50^\circ + 23,45^\circ) = 16,55^\circ$$

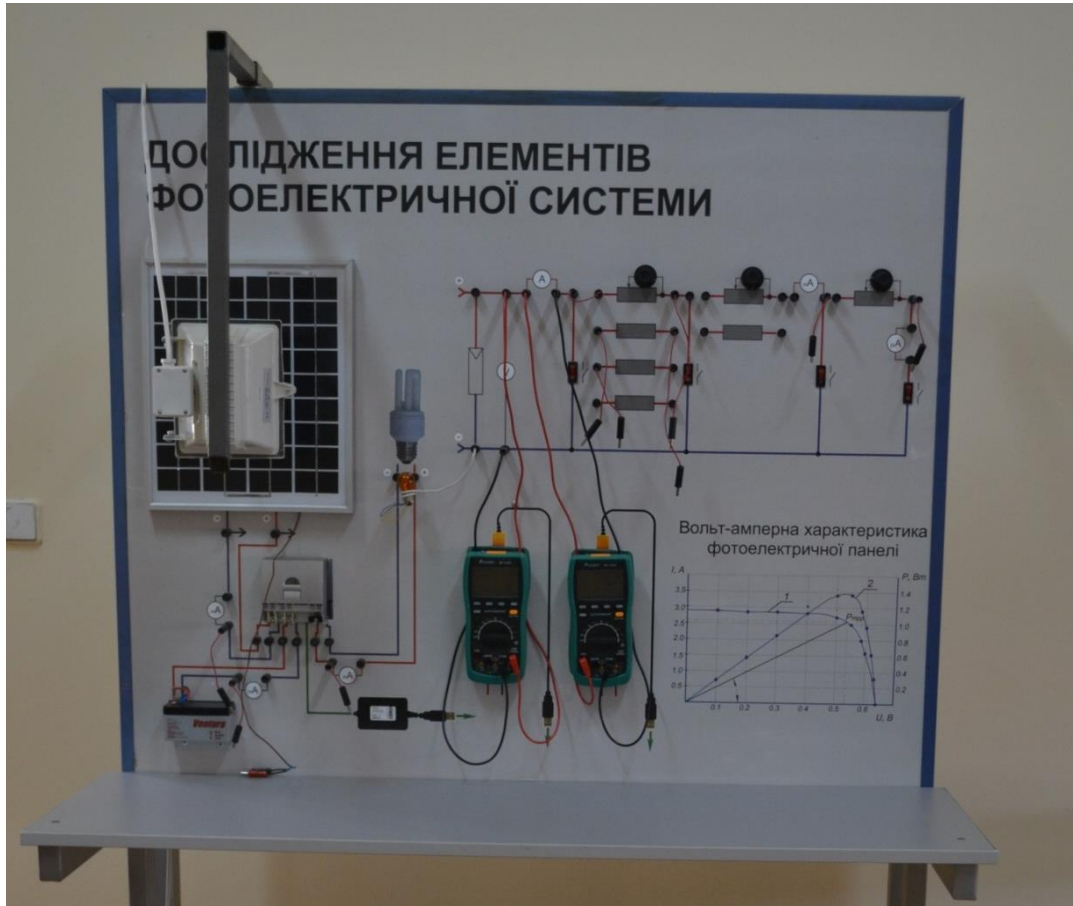


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд лабораторного стенда для вимірювання робочих характеристик сонячних елементів і панелей

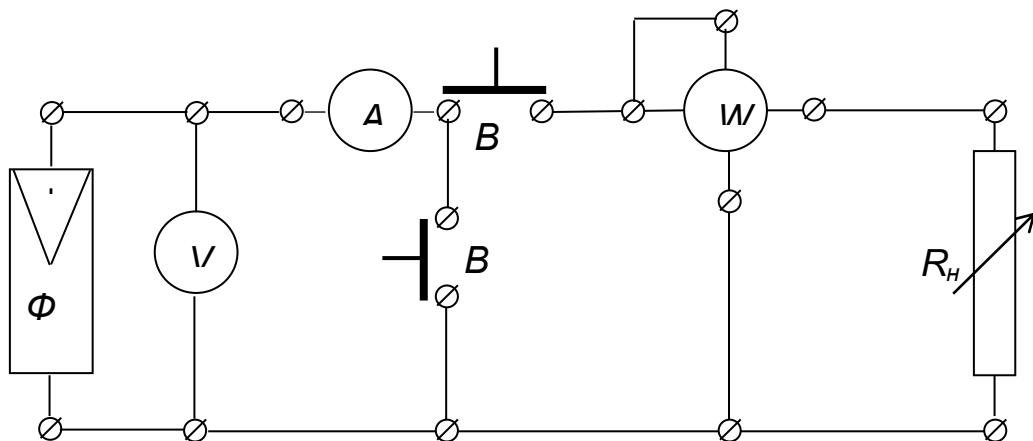


Рисунок 3.6 – Принципова електрична схема лабораторного стенда.

Використання поворотної платформи з двома фотомодулями однакового напівпровідникового матеріалу, дозволяє уникнути складної процедури зведення вимірних показників ефективності до одного масштабу чи стандарту. І навпаки, якщо вони відрізняються тільки технологіями обробки прозорої поверхні, то різницю у їх ефективності легко виявити простим порівнянням відповідних залежностей – наприклад погодинних або кумулятивних кривих.

Сучасні вимірювальні засоби з автоматичною миттєвою реєстрацією результатів дозволяють усю процедуру проходити за декілька хвилин включно з операцією зміни кутових відхилень та наступним опрацюванням комп'ютерними засобами [19]. У півгодинний полудневий період незначні зміщення Сонця від південного напрямку практично не впливають інтенсивність потоку його випромінення. Відтак, за короткий час практично нерухомого Сонця можна виконати кількаразове вимірювання контрольних параметрів фотомодуля – струму короткого замикання $I_{кз}$, напруги розімкненого кола $U_{рк}$ (холостого ходу $U_{хх}$) та максимальної потужності P_{mpp} .

Станом на дату літнього сонцестояння (21 червня) спектр сонячного променя з таким нахилом відповідає атмосферній масі

$$m = \frac{\exp\left(-\frac{z}{8334,5}\right)}{\cos\theta_z + 0,50572 \times (96,07995 - \theta_z)^{-1,6354}} = \frac{\exp\left(-\frac{0}{8334,5}\right)}{\cos 16,55 + 0,50572 \times (96,07995 - 16,55)^{-1,6354}} = \frac{1}{0,9586 + 0,50572 \times 79,52^{1,6354}} = \frac{1}{0,9590} = 1,04$$

При використанні програмного продукту Ексель можна обчислити zenітний кут, відповідний цілочисельному значенню атмосферної маси. Для таких мас розраховано спектральний розподіл сонячних променів за довжиною хвилі і енергії, за яким можна оцінити спектральну ефективність

фотоелектричного перетворення. Відтак алгоритм сканування кутових відхилень за допомогою полярно-поворотного сонячного трекара проектують відповідно кінцевій меті дослідження.

Важливим показником ефективності роботи сонячних панелей протягом дня, місяця чи року є так званий кумулятивний ефект – кількість енергії W , яка надійшла на поверхню фотомодуля (енергетичну експозицію) або генеровану ним кількість електрики. Першу енергію зазвичай розраховують за результатами опосередкованих вимірювань, а другу вимірюють безпосередньо електричним лічильником.

У загальному випадку інтенсивність процесу накопичення часто ілюструють відповідними часовими залежностями, наприклад оцінюють ступенем почорніння фотоплівки (сенситометричною кривою), або сумуванням поточних надходжень протягом години чи дня (див. рис. 1.1). Відповідно усереднені значення цих величин публікують у доступній довідниковій літературі з метеорології [4], або більш сучасних електронних базах даних актинометричних величин [5].

Поточна потужність і годинна продуктивність енергетичної установки пропорційна кутовому коефіцієнту дотичної до кривої накопичення, а денна продуктивність – площі під нею. За кумулятивними кривими зручно прогнозувати денну продуктивність фотоелектричних установок та її динаміки протягом дня, подібно до прогнозів погоди на основі усереднених показників інсоляції.

Розділ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Правові питання

Гарантії прав на охорону праці починаються вже з моменту обговорення та укладання трудової угоди, оскільки згідно ст. 5 Закону «Про охорону праці» умови трудового договору не можуть містити положень, що суперечать законам та іншим НПАОП. 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, які ще не усунуто, можливі наслідки їх впливу па здоров'я та про права працівника на пільги і компенсації за роботу в таких умовах.

Працівнику не може пропонуватися робота, яка за медичним висновком протипоказана йому за станом здоров'я. До виконання роби підвищеної небезпеки та тих, що потребують професійного добору, допускаються особи за наявності висновку психофізіологічної експертизи.

Враховуючи те, що для мінімізації ризику професійного захворювання та травматизму працівників, пов'язаних з питаннями експлуатації ФЕС, пов'язаних з діагностикою їх стану в темпі процесу вимагається вирішення цілого комплексу питань з охорони праці, тому сформулюємо основні задачі охорони праці за темою «Методи та засоби діагностування фотомодулів сонячних енергетичних установок»:

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 висоді встановлення сонячних

панелей, всередині приміщень для монтажу пусконалагодувальних операцій електрообладнання та обслуговування акумуляторів.

4.2 Безпека роботи з сонячними панелями на висоті

Сонячні панелі складені з сонячних модулів, які генерують постійний струм напругою близько 22 при розімкненому зовнішньому колі та близько 15 вольт при розімкненому. При їх комутації у сонячні батареї напруга зростає до рівня, яка при збігу обставин може становити реальну небезпеку персоналу. Тому правила поведінки 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, як правило, ведуть на висоті, 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 батареї 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 ві сонячних панелей, тому важливо дотримуватися запобіжних заходів – попередньо знеструмити об'єкт, перевірити відсутність напруги, не працювати під навантаженням. Металеві корпуси панелей потрібно заземлювати для відводу високовольтних імпульсів комутаційних напруг та впливу атмосферної електрики.

4.3 Безпека роботи з силовим обладнанням

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні встановлюють допустиму температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря у певних діапазонах в залежності від періоду року та категорії робіт і допустиму інтенсивність опромінення. Нормовані параметри мікроклімату у робочій зоні залежать від пори року і категорії робіт і зводяться до таких вимог:

1. Температура внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочоїзони і зовнішніх поверхонь обладнання при забезпеченні оптимальних параметрів мікроклімату не повинні бути більше ніж на 2°C за діапазон норм.

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 нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця для недопущення нагромадження пилу. Тому необхідно здійснювати регулярні заходи з його видалення і щоденного протирання зон його осідання у неробочий час з вимкненим устаткуванням.

4.4 Вимоги до виробничого освітлення

В залежності від джерела світла промислове освітлення поділяють на:

- природне світлом неба (прямого або відображеного), яке проникає через світлові прорізи в зовнішніх огорожених конструкціях і яке найбільшсприятливіше за спектральним складом. Природне освітлення характеризується коефіцієнтом природної освітленості КПО, рівним відношення природного освітлення, яке створюється в деякій точці заданої площини всередині приміщення світлом неба, до значення зовнішньої горизонтальної освітленості.

Прийняте роздільне нормування КЕО для бічного і верхнього освітлення. Ті місця, що освітлюється тільки бічним світлом, нормується мінімальне значення КПО в межах робочої зони, що повинно бути забезпечене в точках, найбільше віддалених від вікна.

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

4.5 Умови безпечної роботи з акумуляторами

Для зняття і перенесення акумуляторної батареї треба одягати спеціальний одяг, гумові фартухи, чоботи і рукавички, так як електроліт руйнівню діє на одяг і взуття і може викликати опіки шкіри. При потраплянні рідини або електроліту на органи тіла потрібно змити їх рясним струменем 10% -го розчину соди або розчину нашатирного спирту у воді.

Після роботи з акумуляторами і перед прийняттям їжі необхідно ретельно вимити руки гарячою водою з милом. Забороняється палити, а також зберігати продукти і їжу в робочих приміщеннях, пов'язаних з обслуговуванням і ремонтом акумуляторів. \

Батареї акумуляторів необхідно утримувати в чистоті; періодично (через кожні 15 днів) протирати їх поверхню чистою ганчіркою, попередньо злегка змоченою в 10% -му розчині нашатирного спирту для нейтралізації сірчаної кислоти, і потім ретельно витирати сухою ганчіркою. У працюючих акумуляторів слід систематично прочищати отвори в корках, для профілактики засмічення і зростання надлишкового тиску газів усередині комірок, для запобігання випучуванню та руйнуванню стінок.

Затискачі батареї і наконечники проводів необхідно очищати від оксидів і змащувати технічним вазеліном для запобігання від подальшого окислення. Контакт між затискачами і наконечникам проводів і клемми акумуляторів батареї повинен бути досить щільним, для запобігання їх ковзанню, іскрінню, короткому замиканню з швидкому розряджанню та можливою розгерметизацією. Тому приміщення з акумулятором повинно бути обладнане припливно-витяжною вентиляцією.

При роботі з акумуляторами всередині приміщень слід користуватися тільки вибухозахисними лампами напругою живлення не вищими за 12 в. У разі користування вилкою навантаження попередньо відкрити герметизуючі корки для запобігання скупченню газів всередині вибухонебезпечних газів.

Також не можна близько нахилитися до розгерметизованих, через небезпеку подразнень слизової оболонки та очей заряджання акумуляторних батарей не можна користуватися вилкою навантаження через можливе від іскріння на клеммах.

Розділ 5 ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХОДІВ З ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

5.1 Економічна ефективність заходів з підвищення ефективності сонячних панелей

Розроблена методика оцінювання і робочого стенда з вимірювання енергетичних показників сонячних панелей у режимах інсоляції, далеких від стандартизованих для спектрів – вхідного сонячного потоку та невизначеної інтенсивності відбитого потоку прозорою поверхнею фотомодуля і його просторового розподілу.

Розробка насамперед розрахована на оцінку потенціалу сонячної енергії при низьких висотах світила над горизонтом, з помітними зміщеннями максимуму спектрального розподілу енергії від інтервалу чутливості сонячних елементів. По друге – на оцінку підвищення оптичних втрат при великих кутах освітлення залежних від поточного стану прозорого покриття і технологій його просвітлення.

Максимальний ефект від обох чинників можна оцінити за результатами натурних випробувань [21] і чисельного моделювання [3] денної продуктивності однакових фотомодулів – стаціонарного (орієнтовного на південь нахиленого під сталим кутом до горизонту), вертикально осьового та оптимального режиму двокоординатного стеження за Сонцем.

За результатами дослідження у натурних умовах, енергетична експозиція у режимі стеження (від сходу Сонця до його заходу) майже на 40% перевищує таку для стаціонарного фотомодуля з 6-годинною експозицією. Причому у режимі стеження враховується зміна спектрального складу сонячних променів протягом дня, яка за оцінкою публікації складає до 5% приросту продуктивності. Тоді як для стаціонарного фотомодуля основним фактором зменшення денної продуктивності є обмеження експозиції двома 3-годинними

інтервалами відносно полудня у поєднанні з незначними приростами кутів освітлення. З наведених результатів випливає очевидна доцільність замінити енергозатратний алгоритм неперервного стеження за Сонцем трьома енергоощадними стаціонарними орієнтаціями: ранковим, полуденним та надвечірнім. Економічний ефект очікується від зменшення вартості механізму повороту та затрат на його експлуатацію.

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

1. Високу ефективність роботи складних багатомодульних фотоелектричних інсталяцій забезпечують заходами на усіх виробничих етапах – від їх комплектації модулями з однаковими робочими характеристиками до їх вилучення чи заміни при небажаних відхиленнях від заявлених показників.

2. Протягом дня режими експлуатації фотомодулів виходять за межі стандартів спектрального складу сонячних променів та сприйняття їх енергії при великих кутах освітлення.

3. Обґрунтовано методику оцінки їх ефективності за величиною струму короткого замикання та складено відповідну вимірювальну установку на базі діючого лабораторного обладнання – полярно поворотного трекера і вимірювального стенда для дослідження вольтамперних характеристик сонячних панелей.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. WMO-No. 8. Secretariat of the World Meteorological Organization – Geneva – Switzerland. 2006.
2. Kipp & Zonen: Solar energy. Guide. Russian.pdf. Измерение солнечного излучения в солнечной энергетике. Электронный ресурс <https://www.kippzonen.com>. Дата звернення 12.12.2024
3. Гальчак В.П., Боярчук В.М., Сиротюк С.В., Коробка С.В., Саницький Т.О. Сонячна енергія та інсоляція. Львів. Магнолія 2006, 2024. 242 с.
4. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Выпуск 10, Украинская ССР. Книга 1. Ленинград: Гидрометиздат, 1990. 595 с.
5. NASA Surface meteorology and Solar Energy – Available Tables. URL: <http://power.larc.nasa.gov>. Дата звернення: 12.12.2024 р.
6. Колонтаєвський Ю.П., Тугай Д.В., Котелевець С.В. Фотоенергетика. Навчальний посібник. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. 2019. – 160 с.
7. Гальчак В. П., Боярчук В. М. Альтернативні джерела енергії. Енергія Сонця. Львів: Вид-во ЛНАУ, 2008. – 135 с.
8. Вамболь С.О., Сичікова Я.О., Дейнеко Н.В. Энергоэффективность фотоэлектрических преобразователей для обеспечения экологично чистой энергетики: [монографія] – Бердянськ : Видавець Ткачук О.В., 2016. – 256 с.
9. Christiana Honsberg and Stuart Bowden. Photovoltaics: Photovoltaic devices, V. 1. University of New South Wales Photovoltaics Centre, 1999. ISBN 0733405967, 9780733405969.
10. Giorgio Belluardo, Grazia Barchi, Dietmar Baumgartner, Marcus Rennhofer, Philipp Weihs, David Moser. Uncertainty analysis of a radiative transfer model using Monte Carlo method: impact on PV device calibration parameters.

Proceedings of the OTTI's 31st Symposium Photovoltaic Solar Energy. Bad Staffelstein, Germany, 2016.

11. Hugo Nunes, Maria Do Rosário Calado, Sílvio Mariano, and José Pombo. An Experimental Analysis of the Electrical Parameter Variation of a Photovoltaic Module. International Congress on Engineering — Engineering for Evolution, KnE Engineering, pages 820-832. DOI 10.18502/keg.v5i6.7102.

12. Detlev Heinemann. Energy Meteorology. Lecture Notes Postgraduate Programme 'Renewable Energy "Carl v on Ossietzky Universitat" Oldenburg, 2002. 124 p.

13. D. L. King, W. E. Boyson, J. A. Kratochvil Photovoltaic Array Performance Model. – SAND2004-3535; Photovoltaic System R&D Department. Sandia National Laboratories. Albuquerque, New Mexico. Unlimited Release. Printed August 2004. – 41 p.

14. Bruce H. King, Clifford W. Hansen, Daniel Riley, Charles D. Robinson and Larry Pratt. Procedure to Determine Coefficients for the Sandia Array Performance Model (SAPM). Prepared by Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. Giorgio Belluardo, Jochen Ernst Wagner, Anke Tetzlaff, and David Moser Evaluation of spectral effect on module performance using modelled average wavelength. Proceedings of the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, France, 2013. 3561-3566.

19. Гуменюк Д. В. Автоматизована система визначення параметрів моделі сонячних елементів. ElectronAcoustEng, 2019, vol. 2, no. 3. – 21-26.

20. Kamila Klimek, Mgdalena Kaplan, Volodymyr Halchak et all. Oritntation and Exposure Efficiency of Solar Tracking Surface in Clear Sky/ Applied Sciences, 2022, 12,9118/ <https://doi.org//10.3390/app12189118>.

21. Боярчук В. М., Гальчак В. П., Сиротюк В. М. та ін. Дослідження електричної продуктивності фотомодуля у режимі слідкування за сонцем. Вісник ЛНАУ. Агроінженерні дослідження. – 2008. – №12, т.2 – с. 504-510.