

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО

ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

першого (бакалаврського) рівня освіти на тему:

**«Розробка лабораторного стенду з вимірювання темнових
вольт-амперних характеристик фотоелектричних панелей»**

Виконав: студент 4-го курсу

групи Ен –41 спеціальності 141

«Електроенергетика, електротехніка
електромеханіка»

_____ Медвецький В. А.

Керівник: канд.. ф-м. наук, доцент

_____ Гальчак В. П.

ДУБЛЯНИ 2025

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

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський) рівень

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

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

“ ____ ” _____ 2025 року

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Медвецькому Валентину Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Розробка лабораторного стенду з вимірювання темнових вольт-амперних характеристик фотоелектричних панелей» Керівник к.ф-м.н., доцент Гальчак В.П.

(наук.ступінь, вч. звання, прізвище, ініціали)

затверджені наказом Львівського НУП 123/к-с 25.02.2025

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 16.06.2025 р.

3. Вихідні дані

технічна документація, науково-технічна і довідкова література

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

Вступ

4.1. Вольтамперні характеристики сонячних елементів і панелей

4.2. Засоби та методика вимірювання темнових ВАХ

4.3. Розробка вимірювального стенда

4.4. Охорона праці у надзвичайних ситуаціях

4.5. Оцінка економічної ефективності проекту

Висновки і пропозиції

Перелік джерел посилання

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	Городецький І. М. к.т.н., доцент			

7. Дата видачі завдання: 25.02.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вольтамперні характеристики елементів і панелей	25.02.2025 – 25.03.2025	
2	Засоби та методика вимірювання темнових ВАХ	26.03.2025 – 26.04.2025	
3	Розробка вимірювального стенда	28.04.2025 – 28.05.2025	
4	Охорона праці у надзвичайних ситуаціях	29.05.2025 – 31.05.2025	
5	Економічна частина	01.06.2025 – 08.06.2025	
6	Завершення оформлення ілюстративної частини роботи	09.06.25 – 12.12.25	
7	Завершення роботи в цілому	13.12.25 – 16.12.25	

Студент _____ Медвецький В. А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

УДК 621.311.243: 621.383.51

Медвецький В. А. Розробка лабораторного стенду з вимірювання темнових вольт-амперних характеристик фотоелектричних панелей
Кваліфікаційна робота. Кафедра енергетики. ЛНУ ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, 2025, 45 с. текст. част., 25 рис., 1 табл., 12 слайдів презентацій Power Point і перелік використаних посилань з 13 найменувань

Метою кваліфікаційної роботи є розробка лабораторного стенда для вимірювання тіньових вольт-амперних характеристик фотоелектричних панелей на базі уже існуючого для виконання лабораторних робіт з фотоенергетики. Для досягнення поставленої мети спочатку попередньо уточнено поняття цього терміну для $p-n$ переходу і його особливостей у напівпровідникових елементах діодах фото- і сонячних елементах. Так само уточнено назви і напрями темнових струмі у залежності від полярності прикладеної до сонячного елемента напруги.

Обґрунтовано вибір вимірювальних засобів для експериментального визначення темнових ВАХ фотомодуля, як залежності темнових струмів від прикладеної напруги з врахуванням діапазону їх зміни при реальних режимах експлуатації. Розроблено вимірювальну схему та діючий макет розширення стенда з засобами комутації для оперативної зміни полярності прикладеної напруги, та вимірювальних засобів відповідно напрямку та діапазону поточних значень темнових струмів. Засобами графічного редактора середовища Ексель побудовані ВАХ прямого і зворотного темнових струмів, близькі до наведених у літературі.

ЗМІСТ

	Вступ.....	6
1	ВОЛЬТАМПЕРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ І ПАНЕЛЕЙ	7
1.1	Вимірювальний стенд лабораторії відновлюваної енергетики.....	7
1.2	Вольт амперна характеристика р-n переходу	9
1.3	1.2 Світлові, тіньові і темнові ВАХ сонячних елементів та панелей	12
2	ЗАСОБИ ТА МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ ТЕМНОВИХ ВАХ	17
2.1	Заступна електрична схема сонячного елемента і панелі	17
2.2	Світлові і темнові характеристики фотомодулів	19
2.3	Параметри та діапазони вимірюваних величин	21
2.4	Стандарти тестування сонячних панелей	24
3	РОЗРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОГО СТЕНДА	27
3.1	Розширення функцій лабораторного стенда	27
3.2	Засоби контролю за світловими і температурними режимами	30
3.3	Схема та методика вимірювання темнових струмів фотомодуля ..	33
3.4.	Результати тестування розробленого стенда	35
4	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	40
4.1	Безпека роботи з фотоелектричними установками	40
4.2	Умови безпечної роботи з акумуляторами	41
4.3	Потенційні загрози довкіллю	42
5	ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	43
	ВИСНОВКИ	44
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ПОСИЛАНЬ	45

ВСТУП

Виробники сонячних панелей зазвичай запевняють, що протягом 20 років експлуатації їх продуктивність зменшується до 80% початкової внаслідок природної деградації структури напівпровідникової основи. Перші встановлені в Україні сонячні електростанції уже подолали цей термін, тому змушені розробляти варіанти компенсації втраченої потужності або оновлення матеріальної бази новими фотомодулями вищої якості та продуктивності.

З практики відомо, що навіть найефективніше працюють фотомодулі з дуже близькими параметрами вольтамперних та вольтватних характеристик. Але навіть одна дефектна панель у складі їх збірки може відчутно змінити її енергетичні показники. Відтак постійно зростає запити на періодичний або постійний моніторинг діючих фотоенергетичних установок на предмет відповідності сонячних панелей їх заявленим характеристикам. За результатами обґрунтовують необхідність заміни окремих панелей новими або переукомплектації діючих енергетичних установок приладами з близькими відхиленнями від енергетичних параметрів від середніх значень.

В обох випадках потрібно вдосконалювати та розширювати сервісні технології з опорою відповідну вимірювальну базу та підготовлений персонал. Складність завдання полягає у тому, що ефективність сонячних панелей у складі фотоелектричної установки визначають одразу кількома внутрішніми взаємозалежними величинами та багатьма незалежними зовнішніми факторами – потужністю навантаження, температурою довкілля, режимами інсоляції тощо, які протягом дня змінюються переважно випадковим чином. Відтак їх належить враховувати при інтерпретації результатів окремих вимірювань за загальноприйнятими методиками. Альтернативою є приведення поточних контрольованих параметрів до деяких стандартних, відтворюваних на спеціальному вимірювальному стенді, що і відображає тема і мета кваліфікаційної роботи.

Розділ 1. ВОЛЬТАМПЕРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ І ПАНЕЛЕЙ

1.1 Вимірювальний стенд лабораторії відновлюваної енергетики

Найважливішим у лабораторії навчальний вимірювальний стенд призначений тільки для демонстраційного зняття світлових вольтамперних характеристик невеликих за розміром фотомодулів у межах поля рівномірної освітленості розміром 60×60 см. Його вимірювальна схема відповідає наведеній на рис. 1.1.

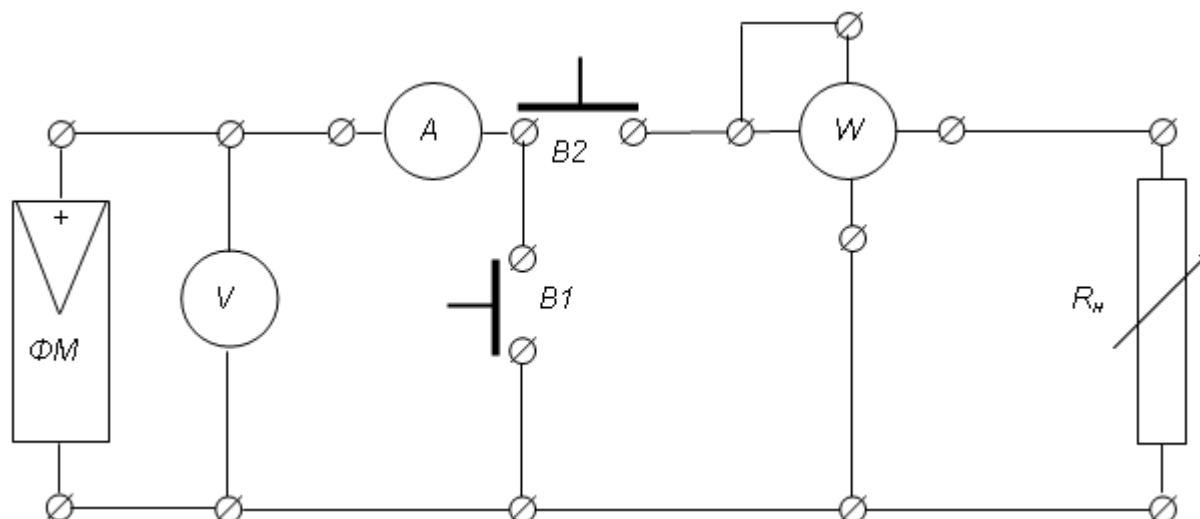


Рис. 1.1. Стендова схема вимірювання навантажувальних вольт-амперних характеристик сонячного модуля

При ввімкненому вимикачі B_1 реалізується режим короткого замикання, а при вимкнених B_1 та B_2 – режим неробочого (холостого) ходу. Режими навантаження реалізуються при ввімкненому вимикачі B_2 . Для мінімізації втрат напруга та струм вимірюють цифровими приладами з незначним власним споживанням.

Світлову вольт амперну характеристику будують за результатами вимірювання струму і напруги на клеммах змінного опору навантаження реостату з потужністю теплового розсіювання, не меншою за потужність

фотоструму у режимі короткого замикання. Досвід проведення лабораторних занять з вимірювання ВАХ фотомодулів на цьому стенді, показав дуже нестабільні результати у режимах, близьких до напруги короткого замикання $U_{кз}$ та холостого ходу $U_{хх}$. Елементарний аналіз причин нестабільності найперше вказує на нестабільний світловий потік, швидке зростання температури фотомодуля при опроміненні потоками, близькими до стандартних для заводських випробувань. А також ненадійне регулювання опору навантаження одно діапазонними реостатами з ненадійним контактами повзунків. Відтак потрібно використовувати принаймі три реостати з засобами їх комутації для оперативною входу відповідний крайнім віткам ВАХ режим навантаження. А для пристосування до вимірювання темнових характеристик фотомодулів, спочатку потрібно уточнити їх фізичний зміст та порядок значень вимірюваних величин для обґрунтування вибору відповідних вимірювальних засобів та периферійного обладнання.

Інтенсивність потоку опромінення світлом лампи розжарення менша за нормативну 1000 Вт/м^2 стандарту випробувань STC, а її живлення від мережі на гарантує його стабільності світлового потоку. Зважаючи, що інтенсивність пропорційна 4-степені температури вольфрамової нитки, то навіть за незначного коливання напруги мережі, світловий потік змінюється відчутно а за ним і фотострум. Відтак стабілізації освітленості випробовуваного фотомодуля лампу розжарювання потрібно живити стабілізованим струмом – наприклад від акумулятора великої ємності з проміжним інвертуванням. У приміщення з практично відсутніми повітряними потоками, опромінюваний фотомодуль швидко нагрівається з відповідним зміщенням вітки ВАХ разом з точками максимальної потужності та напруги холостого ходу (див.). вигляді вітки напруги холостого ходу і з напругу холостого При опроміненні фотомодуля його температуру вимірюють термопарою, прикріпленою скотчем до тильної поверхні з реєстрацією сигналу цифровим мілівольтметром.

1.2. Вольт амперна характеристика p - n переходу

Вольт-амперною характеристикою (ВАХ) матеріалу чи пристрою називають залежність струму в ньому від **прикладеної напруги**. Таке визначення справедливе тільки для пасивних елементів електричної схеми. Тоді як ВАХ активних елементів, наприклад сонячних, у режимі генерування фотоелектрики, означає залежність пропущеного пасивним елементом фотоструму від **спаду напруги** на ньому [1,2]. Тому «вираз від прикладеної напруги» не зовсім коректно вживати для ВАХ характеристики енергетичних перетворень у сонячних елементах.

Їх ВАХ записують формулою але частіше ілюструють графічно, де напруга відкладається вздовж осі абсцис, а струм – осі ординат. ВАХ напівпровідникових матеріалів часто приводять у вигляді залежності густини струму від прикладеної напруги. Найпростішу лінійну залежність має ВАХ опору навантаження, яку описують законом Ома для ділянки кола:

$$I(U) = U / R \quad (1.1)$$

Натомість вольт-амперні характеристики напівпровідникових елементів, у тому числі сонячних, залежать від дуже багатьох мінливих протягом дня факторів. Їх не завжди вдається звести до простих співвідношень, які пов'язаних насамперед з властивостями p - n переходу. Сонячні панелі (фотомодулі) зазвичай складають з 36 або 72 сонячних елементів будова яких відповідає схемі на рис. 1.2 [1].

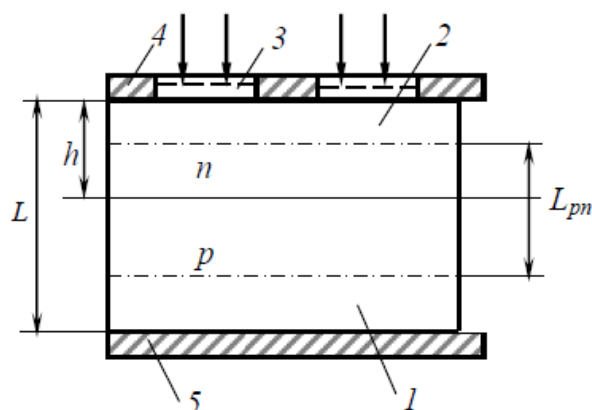


Рис. 1.2 Будова планарного сонячного елемента

Основний, нижній, шар 1 напівпровідника p -типу, товщиною у декілька десятих міліметра, контактує з тонким шаром 2 кристалічного кремнію n -типу.

Ще вище нанесено просвітлюючий шар 3 для ефективного пропускання світла і струмопровідні металеві контактні смужки 4 для виведення генерованого у фотоструму у зовнішнє коло. Тоді як його нижня неосвітлена тильна поверхня покрита суцільним металевим контактом 5.

Конструктивно сонячні елементи виготовлять у вигляді тонкої пластини (товщиною біля 0,3мм) кристалічного кремнію розміром 10х10см. Методом термодифузії через обидві поверхні напівпровідника у його об'єм вносять домішкові атоми для створення донорної (n) акцепторної (p) областей кристалу і p - n переходу між ними. На межі їх розділу виникає різниця концентрацій носіїв електричних зарядів одного знаку. Але внаслідок хаотичного руху вони постійно дифундують в область з меншою концентрацією та утворенням контактної різниці потенціалів ϕ_k між обома областями напівпровідника. Значення контактного потенціалу розраховують через співвідношення концентрацій зарядів в обох частинах напівпровідника за такими формулами:

$$\phi_k = \frac{kT}{q} \ln(p_p / p_n) = \frac{kT}{q} \ln(n_n / n_p), \quad (1.1)$$

де: $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана; T – абсолютна температура; q – заряд електрона у кулонах. При кімнатній температурі потенціальний бар'єр $\phi_k \approx 0,026$ електрон-вольт.

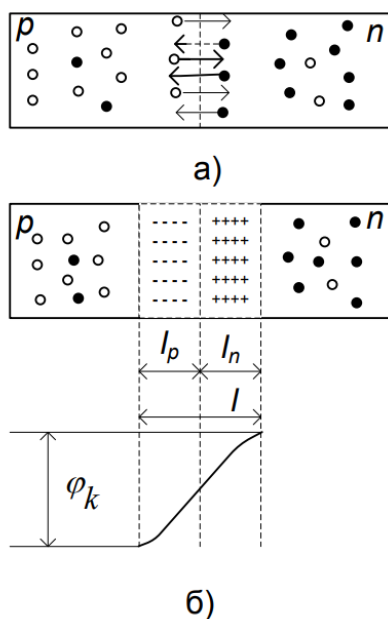


Рисунок 1.3 – Утворення контактної різниці потенціалів у напівпровідників з різним типом провідності [3]

Контактний потенціал гальмує потоки основних зарядів і прискорює потоки неосновних. Відтак всередині області p - n переходу утворюється збіднена рухомими зарядами ділянка з потенціальним бар'єром ϕ_k та відповідно збільшеним електричним опором.

Як показано на рис. 1.3, гальмівний потенціал та межі p - n переходу зменшується або збільшується у залежності від полярності напруги прикладеного зовнішнього джерела. На цих властивостях ґрунтується робота фотодіода, який при освітленні переходить у режим роботи фотоелемента.

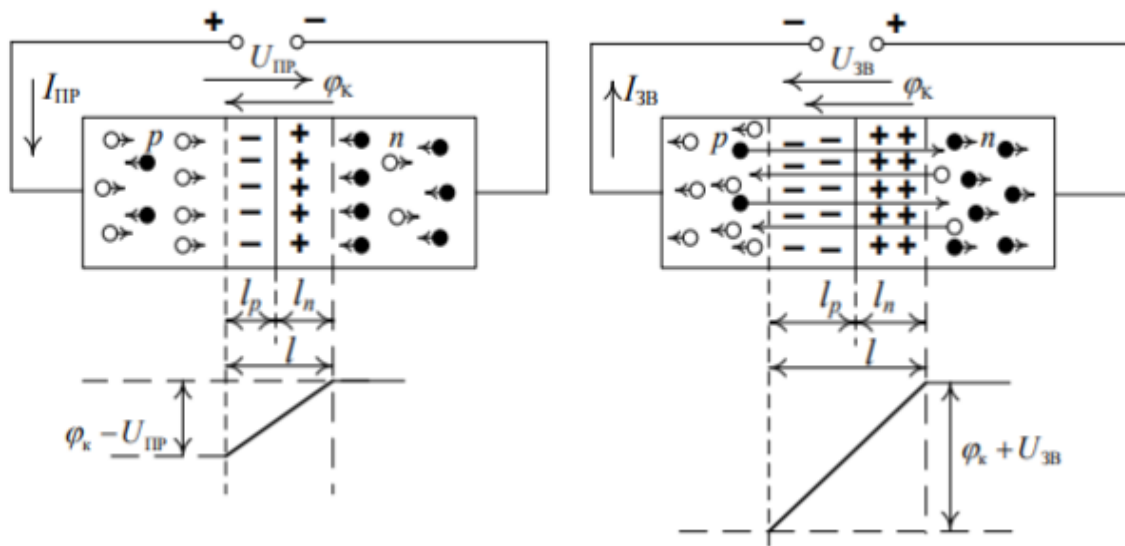


Рисунок 1.4 Зміна меж p - n переходу і потенціального бар'єру від полярності зовнішнього джерела струму [3]

Так, плавною зміною значення прикладеної напруги та її полярності з переходом через нуль, отримують ВАХ діода (див. рис. 1.4) з крайніми межами, залежними від фізичної стійкості напівпровідникового матеріалу.

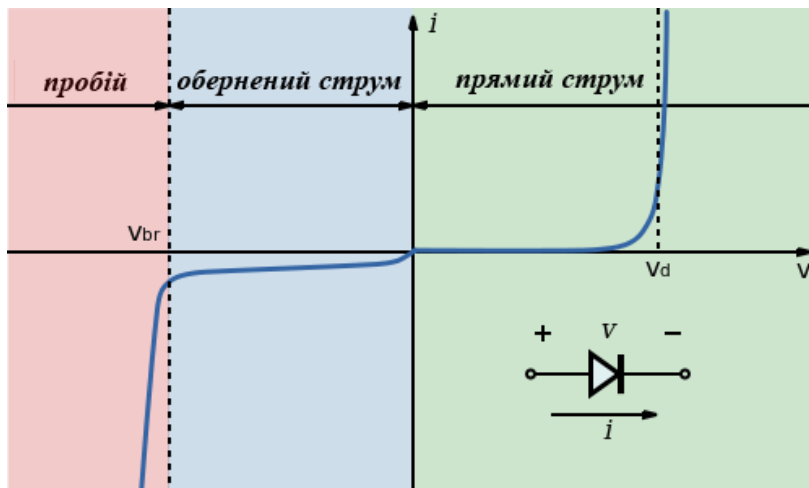


Рис. 1.5 Типова ВАХ p - n переходу н/п діода

Натомість при освітленні p - n переходу реалізуються три режими його роботи залежно його навантаження (див. рис. 1.6) : а – холостого ходу; б – короткого замикання та в – резистивного опору, де діодом позначають зворотні струм всередині p - n переходу .

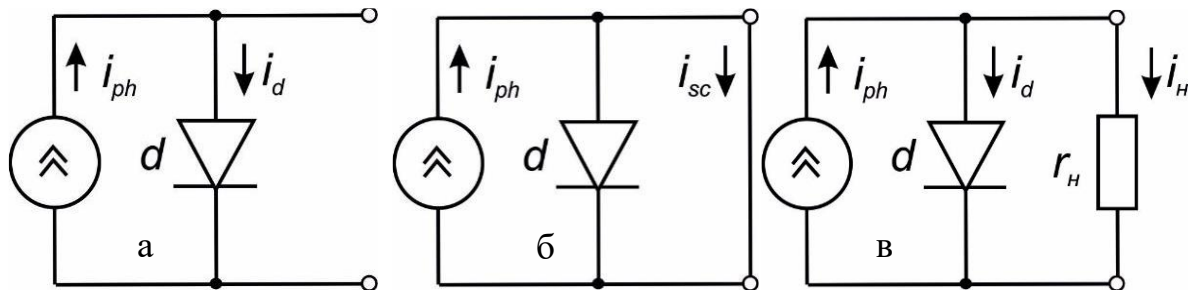


Рисунок 1.6. Еквівалентні схеми заміщення фотоелемента для трьох основних режимів його роботи: а – холостого ходу; б – короткого замикання; в – резистивного навантаження [2]

1.2 Світлові, тіньові і темнові ВАХ сонячних елементів та панелей

На рис. 1.5 від’ємна гілка фотоструму відповідає оберненій полярності прикладеної до фотодіода напруги, а додатна гілка прямій. Відтак повну ВАХ характеризують двома ділянками – темною (dark) і світловою (illuminated) зміщеними по осі струмів залежностями. [4[Klaus Jäger, et. al. Solar Energy. Fundamentals, Technology, and Systems. Copyright Delft University of Technology, 2014] (див. рис. 1.7).

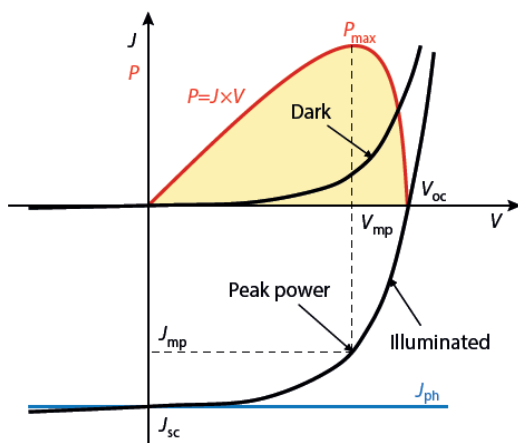


Рис. 1.7 Темнова і світлова ВАХ p - n переходу у двох системах координат, зміщених по осі струму

. Темнові ВАХ фотодіода і сонячного елемента отримують подачею на їх вихідні клеми зовнішньої напруги такої ж полярності, а світлові – за її відсутності, але з власною генерацією фотоструму і напруги при його освітленні. З переходом напруги через нуль, відбувається зміна напрямку струму, та полярності прикладеної напруги. Натомість світлову характеристику отримують замиканням фотоелемента, як джерела фотоструму на зовнішнє навантаження.

При малих опорах навантаження фотоелемент працює у режимі близькому до короткого замикання з сталим значенням струму $I_n \rightarrow I_{кз}$. Такий стан відповідає режиму роботи ідеального джерела струму, незалежного від напруги на його клеммах. Натомість при протіканні через великі опори значення струму наближається до мінімального а напруга на затискачах до максимальної, яку називають напругою холостого ходу $U_n \rightarrow U_{хх}$. Такий режим роботи фотоелемента відповідає режиму ідеального джерела напруги, його вольт амперна відповідає прямокутнику.

Оскільки струм через заступний діод фотоелемента протилежний ідеальному і сталому струму навантаження, то вольт амперна характеристика ідеального фотоелемента рівна їх різниці. Відповідна графічна ілюстрація їх складання наведена а рис. 1.8. [2].

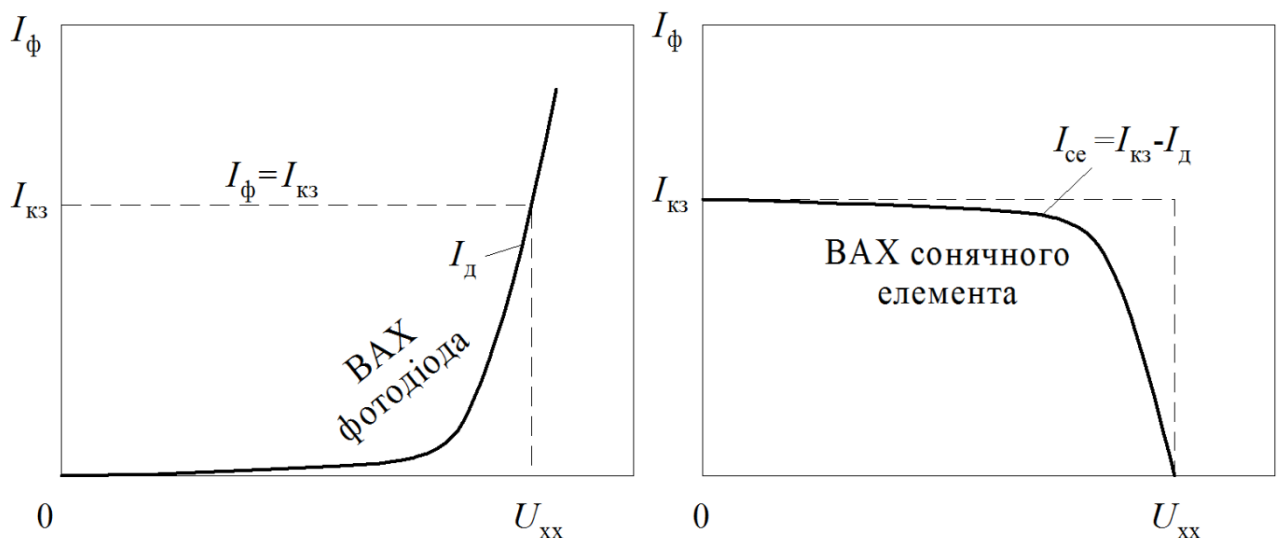


Рисунок 1.8 Утворення ВАХ ідеального сонячного елемента накладанням протилежних струмів фотодіода та ідеального джерела струму [2]

У науковій літературі усі складові гілки повної ВАХ сонячного елемента зазвичай ілюструють графіками у 4-х різних квадрантах координатної системи, наведеній, для прикладу, на рис. 1.6 [5]. У ній початком відліку струмів і напруг нулю прийнято стан відсутності напруги між вихідними клемми сонячного елемента.

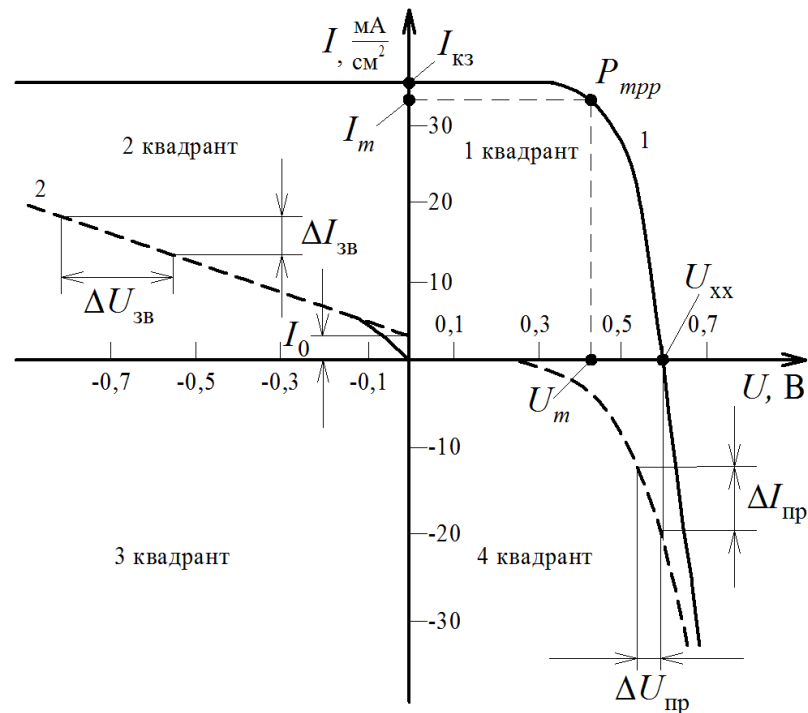


Рисунок 1.9 Повна ВАХ сонячного елемента з ілюстрацією визначення його внутрішніх опорів

Представлена подібним чином ВАХ сонячного елемента є узагальнюючим параметром з оцінки інших його енергетичних, світлових і темнових характеристик, за якими, у свою чергу, розраховують енергетичні параметри сонячних елементів і складених з них сонячних панелей. Але водночас затрудняє її сприйняття та інтерпретацію нефахівцями з фізичної електроніки, наприклад з експлуатації фотоенергетичних установок, які повинні організувати практичні схеми з вимірювання ВАХ сонячних панелей в неідеальних умовах експлуатації. Для них розробляють відповідні навчальні матеріали з додатковими вимогами для забезпечення достовірності результатів вимірювань та обґрунтування на них практичних рекомендацій [6, 7].

Світлові характеристики сонячних елементів описують залежність струму від напруги у режимі їх резистивного навантаження при різних рівнях освітлення і температурних режимах. Значення струму і напруги зовнішнього кола сонячного елемента чи фотомодуля залежить від дуже багатьох факторів, як природних так і конструктивних. Тому робочі режими сонячної батареї розраховують, виходячи за експериментально знятими вольтамперними характеристиками (ВАХ) при різних значеннях світлового потоку Φ до поверхні фотомодуля, вірніше повного потоку сонячної енергії G , і температури його поверхні T .

Фотострум I_Φ ідеального сонячного елемента, фотонапруга U_Φ , темновий струм I_S та навантажувальні параметри – напруга U_H і струм I_H , взаємно пов'язані такими співвідношеннями:

$$U_\Phi = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_\Phi}{I_S} + 1 \right); \quad (1.2)$$

$$I_\Phi = I_H - I_S \left(e^{\frac{qU_H}{AkT}} - 1 \right); \quad (1.3)$$

$$U_H = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_\Phi - I_H}{I_S} + 1 \right); \quad (1.4)$$

Другий доданок залежності (1.3) називають **темною** характеристикою сонячного елемента

$$I_d = I_S \left(e^{\frac{qU_H}{AkT}} - 1 \right) \quad (1.5)$$

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: $A=1$, при перевазі дифузійного процесу, а при $A \approx 2$ – механізм рекомбінації в області виснаження. Відтак темновий струм еквівалентний струму, що проходить через діод під час прямого зміщення напруги за відсутності освітлення.

Темновий струм врівноважує прямий фотострум, у процесі рекомбінації електронів і дірок. Енергія, що звільняється під час рекомбінації, виділяється у вигляді випромінювання фотонів або витрачається на нагрівання кристалічної ґратки. Відтак його функцію на заступній схемі ідеального фото елемента (див. рис. 1.6) позначають обернено ввімкненим діодом, який одночасно вказує на полярність напруги джерела фотоструму.

.

Розділ 2. ЗАСОБИ ТА МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ ТЕМНОВИХ ВАХ

2.1 Заступна електрична схема сонячного елемента і панелі.

Реальний сонячний елемент, характеризують додатковими величинами, пов'язаними з його конструктивним виконанням і технологією виготовлення. У заступній електричній схемі сонячного елемента вони відображені двома опорами втрат – шунтовим $R_{ш}$ та послідовним втрат $R_{п}$ відносно фотоелемента і опору навантаження R відповідно (рис. 2.1).

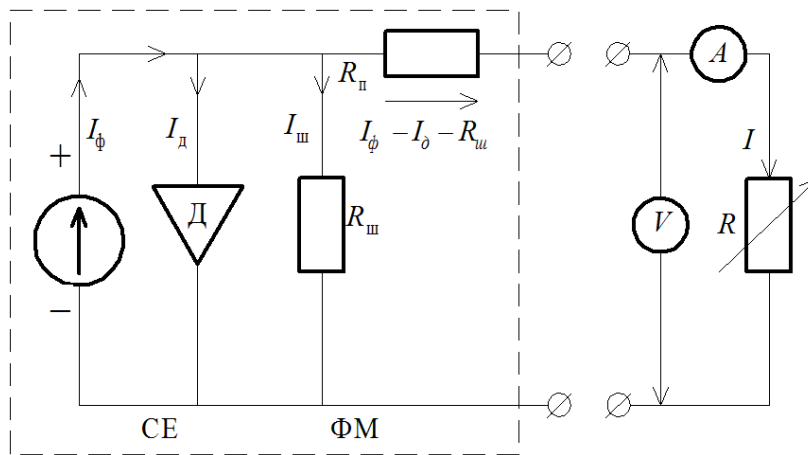


Рисунок 2.1. Заступна схема реального сонячного елемента та фотопанелі з опором навантаження

Перетікання зарядів у зворотному напрямку – кромкою площини $p-n$ переходу – на схемі відображено шунтуючим опором $R_{ш}$. Втрати генерованої потужності за рахунок опору проходження зарядів через об'єм напівпровідника сонячних елементів та їх комутаційні з'єднання у батарею відображено послідовним опором $R_{п}$.

Енергетичні властивості сонячних елементів та панелей оцінюють за параметрами світлових експериментальних або теоретично розрахованих воль-амперних $I(U)$ та вольт-ватних $P(U)$ характеристик, наведених на рис. 2.2.

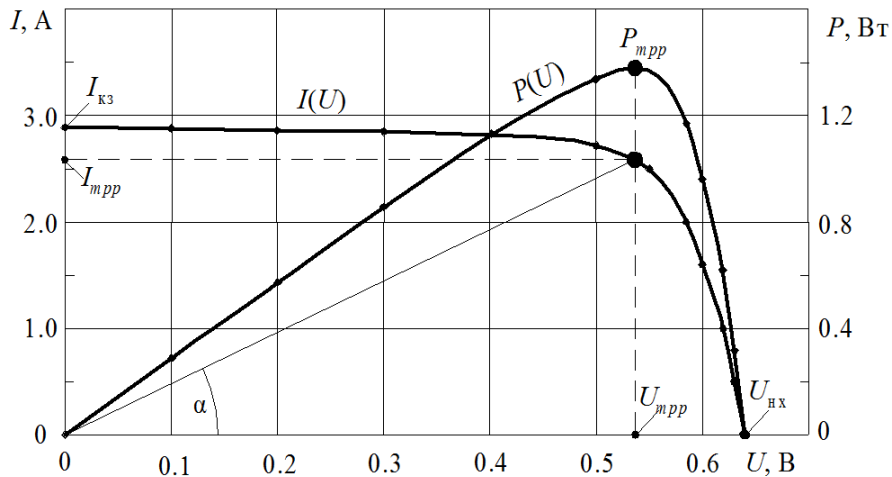


Рисунок 2.2 – Світлові ВАХ кремнієвого сонячного елемента з точками максимальної потужності P_{mpp} (maximum power point) та її координатами по осі струмів I_{mpp} та напруг U_{mpp}

Значення опору навантаження у точці максимальної відповідають очевидному співвідношенню

$$R_{\text{н}} = \operatorname{ctg} \alpha = \operatorname{ctg} \frac{U}{I} \quad (2.1)$$

У режимі, близькому до короткого замикання, $U_{\text{н}} \rightarrow 0$, якому відповідає майже прямолінійна ділянка експериментальної вольт-амперної характеристики з від'ємним кутовим коефіцієнтом нахилу. У цьому режимі опір навантаження наближається до шунтового, яке розраховують через співвідношенням відповідних приростів за формулою:

$$R_{\text{ш}} = \frac{\Delta U_{\text{кз}}}{\Delta I_{\text{кз}}} \quad (2.2)$$

Натомість у режимі, близькому до холостого ходу, струм і напруга у зовнішньому колі визначається величиною послідовного опору $R_{\text{п}}$, який розраховують за такою формулою але іншими приростами:

$$R_{\text{п}} = \frac{\Delta U_{\text{хх}}}{\Delta I_{\text{хх}}} \quad (2.3)$$

Обидві крайні ділянки дуже важко виміряти експериментально, тому на практиці користуються відповідними приростами темної ВАХ, графічно ілюстрованою схемою, наведеною на рис.(1.9). При виготовленні сонячних елементів та панелей значення послідовного опору R_{Π} обмежують для зменшення струму короткого замикання до безпечного значення для матеріалу напівпровідника значень. Їх використовують для моделювання ВАХ фотомодулів за співвідношенням (2.4) при різних значеннях вхідних величин [8].

$$I_{\Pi} = I_{\Phi} - I_S \left(e^{\frac{qU_{\Pi}(U_{\Pi} - I_{\Pi}R_{\Pi})}{AkT}} - 1 \right) - \frac{U_{\Pi} + I_{\Pi}R_{\Pi}}{R_{\Pi}} \quad (2.4)$$

2.2 Світлові і темнові характеристики фотомодулів

Сонячні панелі (фотомодулі) зазвичай складається з 36 або 72 послідовно чи паралельно (шунтово) зібраних сонячних елементів, N_{Π} та $N_{\Pi\Pi}$ відповідно. За їх послідовного сполучення струм I_M і напруга U_M пов'язані з іншими параметрами за відповідно модифікованими формулами

$$I_{\Pi} = I_{\Phi} - I_0 \left(\exp \frac{q(U_M + I_M N_{\Pi} R_{\Pi\Pi})}{N_{\Pi} AkT} - 1 \right) - \frac{U_M + I_M N_{\Pi} R_{\Pi\Pi}}{N_{\Pi} R_{\Pi\Pi}} \quad (2.5)$$

Де параметри з індексом «М» мають фізичний зміст ефективних величини фотопанелей.

Якщо поле фотомодулів зібрана з N_M однакових модулів, з них по N_s послідовно сполучених сонячних елементів у кожному, то їх загальне число

$$N = N_M \times N_{\Pi} \quad (2.6)$$

Натомість у змішаному послідовному N_s та паралельному N_p сполученні фотомодулів загальний вихідний струм I_A та напруга U_A пов'язані між собою подібним попереднім двом рівнянням

$$I_A = N_{\text{ш}} I_{\phi} - N_{\text{п}} I_0 \left(\exp \frac{q \left(V_A + I_A \frac{N_{\text{п}}}{N_{\text{ш}}} R_{\text{п}} \right)}{N_{\text{п}} A k T} - 1 \right) - \frac{V_A + I_A \frac{N_{\text{п}}}{N_{\text{ш}}} R_{\text{п}}}{\frac{N_{\text{п}}}{N_{\text{ш}}} R_{\text{ш}}} \quad (2.7)$$

Якщо для зручності прийняти узагальнені позначення $N_{\text{п}} I_{\phi} \equiv I'_{\phi}$, $N_{\text{п}} I_0 \equiv I'_0$, $(N_{\text{с}}/N_{\text{п}}) R_{\text{с}} \equiv R'_{\text{с}}$ і $(N_{\text{с}}/N_{\text{п}}) R_{\text{п}} \equiv R'_{\text{п}}$, то властивості сонячного елемента, фотомодуля та їх збірки можна записати узагальненим виразом

$$I_A = I'_{\phi} - I'_0 \left(\exp \frac{q(V_A + I_A R'_{\text{п}})}{N_{\text{п}} A k T} - 1 \right) - \frac{V_A + I_A R'_{\text{п}}}{R'_{\text{ш}}}, \quad (2.9)$$

Відтак заступна електрична схема однакова як для сонячного елемента, фотомодуля чи їх збірки.

Внаслідок невеликого послідовного опору $R_{\text{п}}$ напруга на затискачах фотомодуля залежить від струму навантаження $I_{\text{н}}$. Тому у моменти комутації силових елементів можуть виникати нелінійні коливальні процеси, які обмежують швидкодію вимірювальних засобів [9].

Темновий струм $I_{\text{с}}$ породжений термостимульованими носіями обох знаків, які хаотично рухаються у зоні p - n переходу за механізмом термодифузії. Їх концентрація та швидкість дифузійних і процесів зростають з температурою, як і ймовірність їх рекомбінації з фотостимульованими електронно-дірковими парами. Відтак обидві вітки ВАХ – світлова і темнова – опосередковано залежні від температури фотоелемента [2], (див. рис. 2.3).

Оскільки зворотній (темновий) струм проходить через діод, як нелінійний елемент заступної схеми, то для мінімізації спотворень краще використовувати процедури вимірювання з попереднім встановленням стаціонарного стану електричного кола. У тому числі з врахуванням сталої часту встановлення рівноважної температури сонячного елемента від проходження вимірювального струму. Відтак вимірювальний стенд необхідно додатково забезпечити засобами контролю температури і візуалізації динаміки стабілізації вимірювального сигналу. Обидва процеси врівноваження

найпростіше контролювати засобами з неперервного стеження з графічною індикацією їх перебігу.

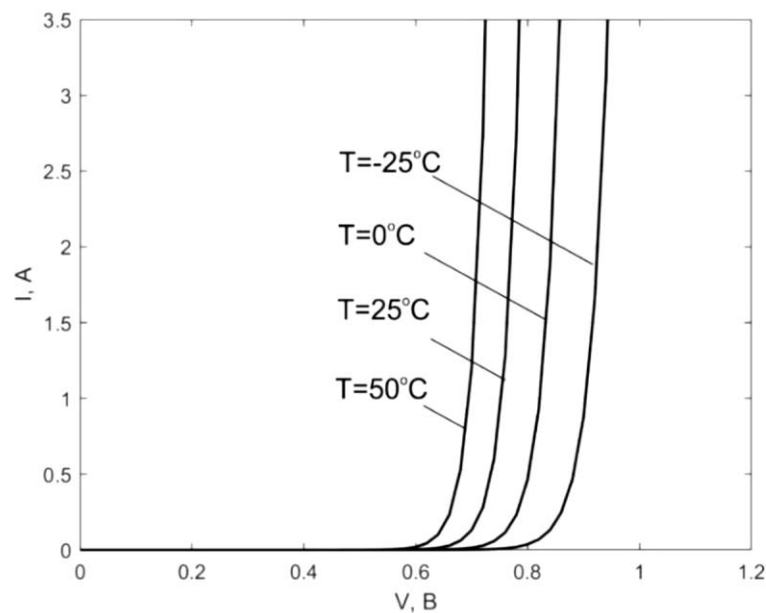


Рисунок 2.3. Зміни ВАХ p – n -переходу з температурою [2]

За високої чутливості фотоелементів до світлового потоку, для вимірювання темнового струму потрібно забезпечити його якісне затемнення. Його пропонується контролювати за відсутністю напруги холостого ходу U_{xx} , або коли середнє значення показів багатократного вимірювання електронним або цифрового вольтметром нехтовно мала величина. Відтак при вимірюванні має відтворюватися типовий для фотодіода вигляд залежності струму від напруги $|I|(|U|)$ для темної гілки ВАХ, наведеної у другому квадранті рис. 1.9. При цьому максимальна зворотна напруга, прикладена до сонячного елемента чи фотомодуля, за абсолютним значенням не повинна помітно перевищувати напругу холостого ходу. Джерелом зовнішньої напруги зазвичай обирають стабілізовані блоки живлення з обмеженнями струму і напруги для безпеки фотомодуля та регульованим виходом, або акумулятор у парі з навантажувальним реостатом.

2.3 Параметри та діапазони вимірюваних величин

За схемою повної ВАХ, наведеної на рис. 1.9, темнові ВАХ сонячного елемента є графічним продовженнями відповідних світлових характеристик,

які відображені у його технічному паспорті. Але внаслідок природної деструкції напівпровідникового матеріалу після тривалої експлуатації, усі параметри потребують уточнення. Відтак вимірюванню темнових характеристик сонячних панелей завжди має передувати попереднє дослідження їх світлових аналогів. Обидва типи вимірювань доцільно проводити на існуючому стенді з доповненням новими вимірювальними засобами, та відповідними їм метрологічними характеристиками.

Діапазони зміни енергетичних характеристик сонячних панелей при максимальних і мінімальних режимах інсоляції та навантаження повинні відповідати метрологічним параметрами нових вимірювальних засобів. Верхні межі визначають за струмом короткого замикання та напругою холостого ходу фотомодуля, а нижні – за мінімальними струмами та напругами сонячних елементів. Але з обов'язковим врахуванням їх типової залежності від освітленості і температури, наведеної на рис. 2.4.

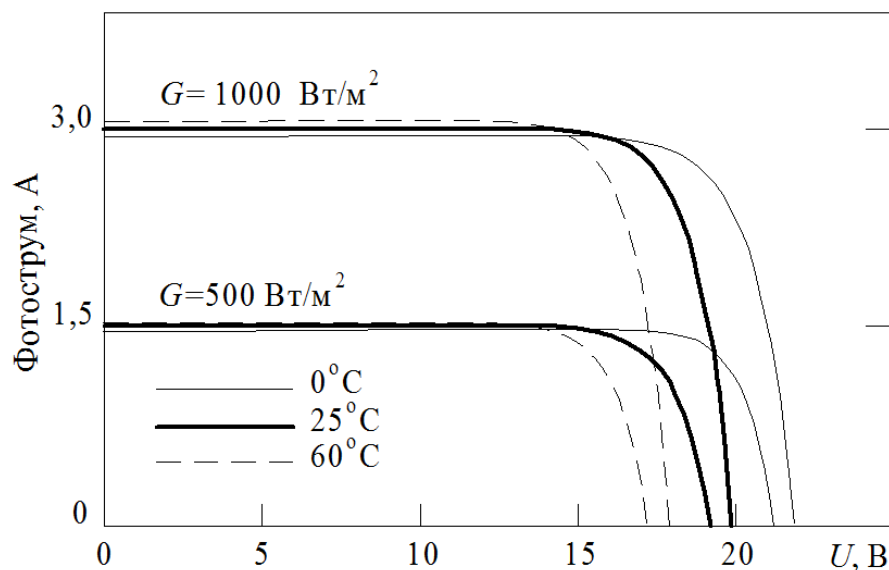


Рисунок 2.4 – Типові зміни ВАХ фотомодуля з освітленістю і температурою

З графічних залежностей видно, що струми короткого замикання практично незалежні від температури і пропорційні світловому потоку. Натомість напругу холостого ходу приймають незалежною від світлового потоку і пропорційною поточній температурі фотомодуля. Температурні

коефіцієнти зміни цих параметрів, розраховані за формулами (2.10)...(2.12) у технічній документації сучасних фотомодулів.

$$\alpha = \frac{dI_{кз}}{dT} \approx \frac{\Delta I_{кз}}{\Delta T} = \text{const} \quad (2.10)$$

$$\beta = \frac{dU_{нх}}{dT} \approx \frac{\Delta U_{нх}}{\Delta T} = \text{const} \quad (2.11)$$

$$\gamma = \frac{dP}{dT} \approx \frac{\Delta P}{\Delta T} = \text{const} \quad (2.12)$$

Значення темнових струмів фотомодуля залежить від способів комутації його сонячних елементів. За послідовного сполучення темновий струм фотомодуля теоретично рівний струму одного елемента а за паралельного – сумарному. А прикладена зовнішня напруга навпаки – рівна сумі напруг усіх елементів, а при паралельному – тільки напрузі одного. У науковій та довідковій літературі замість абсолютних значень світлового темнового струмів сонячного елемента прийнято приводити до одиниці його площі у см². Відтак наведені там типові значення густини струму J мА/см² переводять у їх абсолютні значення множенням на площу S одного сонячного елемента:

$$I = J \times S, \text{ А} \quad (2.13)$$

Як видно з графіка темрової характеристики кремнієвого сонячного елемента на рис. 1.9, струм насичення $J_0 \approx 4$ мА/см², що для його стандартної площі $S \approx 100$ см², рівнозначно абсолютному значенню струму насичення $I_0 = 400$ мА. Такого ж порядку і темновий струм фотомодуля при послідовному сполученні сонячних елементів. Тоді як для лабораторного фотомодуля, складеного з 36 комірок площею 7,5 см² кожна, струм насичення рівний $4 \times 7,5 = 30$ мА. Натомість прикладена до сонячного елемента максимально зворотна напруга порядку $U_{зв} \approx -0,6$ В, яка у перерахунку на фотомодуль з 36 сонячних елементів, буде рівна 26,6 В. Таку напругу забезпечить стабілізований блок живлення постійного струму до 30 В або батарея з трьох 12-вольтних акумуляторів з регулювальним реостатом.

На рис. 2.5 наведені три варіанти схеми комутації умовного реостата навантаження зовнішнього джерела наруги (умовного акумулятора) для зміщення p - n переходу. За ними зручно візуалізувати схему розподілу струмів та полярності вихідної і прикладеної напруги відносно виходів та внутрішніх компонентів заступної схеми сонячного елемента при вимірюванні його світлових і темнових характеристик. За такого їх спільного представлення полегшується сприйняття не завжди однозначно поданої у літературі термінології для характеристики внутрішніх процесів у напівпровідникових елементах різного призначення, у тому числі сонячних.

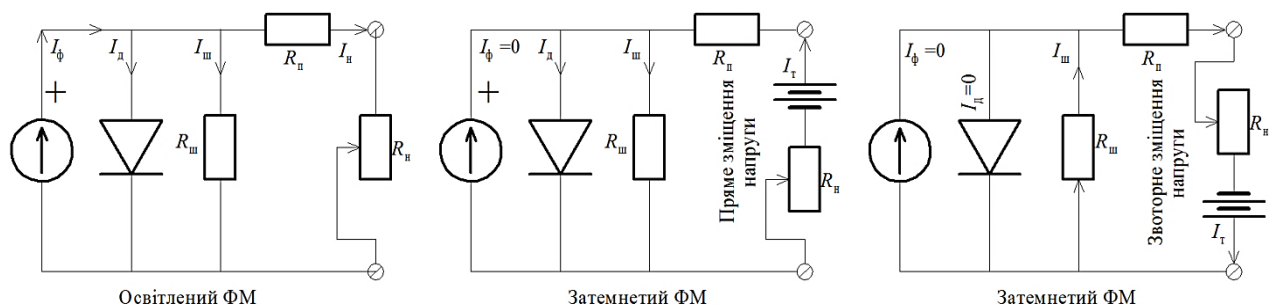


Рисунок 2.5. Варіанти комутації силових елементів схеми для вимірювання світлових і темнових характеристик сонячного елемента чи фотомодуля [2]

2.4 Стандарти тестування сонячних панелей

Графіки експериментальних характеристик сонячного елемента чи фотомодуля будують за результатами вимірювання струму та напруги на клеммах зовнішнього резистивного навантаження R_n . В особливих токах кривих безпосередньо вимірюють значення струму короткого замикання $I_{кз}$, напруги холостого ходу $U_{хх}$ (неробочого $U_{нх}$) і значення максимальної потужності (maximum power point) P_{mpp} .

У технічній документації сучасних сонячних панелей відображені результати тестування виробів при стандартних умовах інсоляції поверхні фотомодуля потоком сонячної спектральної складу AM1,5. Наприклад стандарт випробування STS (Standard Test Conditions) регламентує освітлення променями фотомодуля променями інтенсивністю 1000 Вт/м^2 при температурі сонячних елементів або фотопанелі 25°C . Натомість реальним умовами

експлуатації сонячних елементів краще відповідають вимоги стандарту NOCT (Nominal Operating Cell Temperature), а фотомодулів – NMOT (Nominal Module Operating Temperature) при освітленні потоком сонячної радіації інтенсивністю 800 Вт/м^2 і номінальній температурі експлуатації близько 45°C . Перегрів сонячної панелі тільки на 15 градусів над температурою навколишнього повітря відчутно змінює продуктивність сонячної електростанції які нерідко нагріваються вище за 45° . А звичайного сонячного літнього дня температура панелі нерідко може підніматися навіть до 70°C .

У технічних паспортах сучасних виробів зазвичай відображають результати тестувань за обома стандартами, наприклад у [10]. Темнові вольт амперні характеристики безпосередньо не належать до паспортних, але за ними розраховують важливі для практики внутрішні параметри сонячних елементів та фотомодулів – шунтовий $R_{\text{ш}}$ та послідовний $R_{\text{п}}$ опори, значення яких змінюються при тривалій експлуатації внаслідок природної деструкції напівпровідникових матеріалів [2, 11].

Результати вимірювання вольтамперних характеристик на лабораторному стенді та результати розрахунку окремих параметрів належить порівнювати з паспортними значеннями. Виявлені відхилення найперше аналізують на відповідність стандартним умовам умов освітленості і температури випробувань за методиками та надалі використовують для обґрунтування доцільності їх експлуатації у складі фотоенергетичних установок. Зазвичай найважче відтворити стандартні вимоги до освітлення фотомодуля і запобігти його перегріву. Першу проблему зазвичай закривають імітаторами сонячних променів, або проведенням випробувань при освітленні природним потоком сонячної енергії при ясному небі, що накладає часові та транспортні обмеження випробуванням.

Для оціночних характеристик фотомодулів або навчального процесу, достатньо світлового потоку від лампи розжарювання з подібним сонячному спектральним розподілом, але значним переважанням внеску інфрачервоних променів. Інтенсивність потоку опромінення світлом лампи розжарення

менша за нормативну 1000 Вт/м^2 стандарту випробувань STC, а її живлення від мережі не гарантує стабільності її світлового потоку. Оскільки інтенсивність теплового випромінювання пропорційна 4-степені температури вольфрамової нитки, то навіть за незначного коливання напруги мережі, світловий потік змінюється відчутно а за ним і фотострум. Для захисту фотомодуля від перегріву потрібно неперервно контролювати інтенсивність світлового потоку та його поточну температуру і обмежувати тривалість опромінення.

Сучасні методики обробки результатів вимірювання ВАХ дозволяють врахувати температурні та інсоляційні відхилення від передбачених відповідними стандартами. Відтак при розробці випробувального стенда максимальну увагу потрібно приділяти стабілізації вхідних величин – освітленості фотомодуля і його температури упродовж тестування.

Розділ 3 РОЗРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОГО СТЕНДА

3.1 Розширення функцій лабораторного стенда

Згідно завдання, потрібно пристосувати існуючий лабораторний стенд для вимірювання темнових вольт амперних характеристик сучасних сонячних панелей з більшими габаритами, номінальними струмами та напругами. Для відпрацювання схеми та методики темнових вимірювань запропоновано використати навчальний фотомодуль з 36-и кремнієвих сонячних елементів розміром $2,5 \times 3,0$ см і такими паспортними характеристиками:

- Вихідна потужність $P_{mpp} = 10$ Ват;
- Номінальна напруга $U_m = 17,5$ В;
- Номінальний струм $I_m = 0,57$ А;
- Напруга холостого ходу $U_{xx} = 21,5$ В;
- Струм короткого замикання $I_{кз} = 0,65$ А.

Темнові ВАХ, на відміну від світлових, вимірюють при кімнатній температурі без освітлення фотомодуля – у повній темноті. Їх дотримання забезпечує стабільність та відтворюваність результатів вимірювань, залежних тільки від стабільності прикладеної до фотомодуля напруги постійного струму. Для цього найпростіше використати лабораторний блок живлення постійного струму НУ-3000 з стабілізацією заданих значень регульованої напруги та струму у межах $0 \dots 30$ В та $0 \dots 2$ А відповідно.

Альтернативний варіант [6. 7] – магазин опорів або повзунковий реостат, навантажені на акумулятор (див. рис. 2.5), номінальна напруга якого принаймі на декілька вольт перевищує напругу холостого ходу фотомодуля. Прикладену напругу у проекті пропонується подавати від двох послідовно сполучених акумуляторів LOGIC-POWER AGM–MG 12–20 (рис. 3.1) з номінальними значеннями напруги та ємності 12 В і $C_n = 20$ А·год відповідно та внутрішнім опором $r = 8$ мΩ. Його номінальний розрядний струм при 20-годинній розрядці до напруги 10,5 В або 10-годинній до 9,6 В рівний відповідно

$$I_{20} = C_H/20 = 1,0 \text{ A}; I_{10} = C_H/10 = 2,0 \text{ A}$$



Рисунок 3.1. Батарея з двох акумуляторів для прикладання зовнішньої напруги до фотомодуля

При експериментальному визначенні трьох світлових параметрів фотомодуля світловий потік від лампи розжарювання пропонується стабілізувати її живленням через стабілізатор мережевої напруги або від акумулятора великої ємності з проміжним інвертуванням.

У приміщенні лабораторії з практично відсутніми повітряними потоками, опромінюваний фотомодуль швидко нагрівається з відповідним зміщенням напруги холостого ходу і точки максимальної потужності та світлової віток ВАХ (див. рис. 2.4). Відтак для вимірювання температури фотомодуля і контролю за тепловими процесами на стенді, пропонується використати восьмиканальний регулятор-вимірювач РТ-0802 у з відповідним комплектом термопар.

На лабораторному стенді струм і напругу світлових ВАХ вимірюють універсальними тестерами з ручним перемиканням діапазонів: напруги від десятків мВ до десятків вольт, а струму від десятків мА до 10 або 20 ампер. Тоді як темнові струми фотомодуля характеризують значеннями від кількох мікроампер до 1 ампера у діапазоні напруг від 1 мВ до 30 В. Відтак для вимірювання струмів мікроамперного та міліамперного діапазонів

пропонується цифровий вимірювальний прилад UNI-T UTM1804 (див. рис. 3.2 і 3.3).



Рисунок 3.2. Тридіапазонний вимірювач темнового струму фотомодуля



Рисунок 3.3 Загальний вигляд лабораторного станда з додатковими засобами для вимірювання темнових струмів

3.2 Засоби контролю за світловими і температурними режимами

Напрямок сонячної енергетики лабораторії відновлюваної енергетики забезпечений двома приладами з вимірювання інтенсивності прямого G_b , дифузного G_d і глобального G_{dh} потоків сонячної радіації. На навчальному стенді прямий потік імітують світлом лампи розжарювання, з подібним до сонячного спектральним розподілом інтенсивності. Для його вимірювання доцільно використовувати типовий метеорологічний піранометр ПЗ×3 з чутливою поверхнею розміром 3х3см (рис. 4) і чорно-білими квадратами, розміщеними у шаховому порядку.

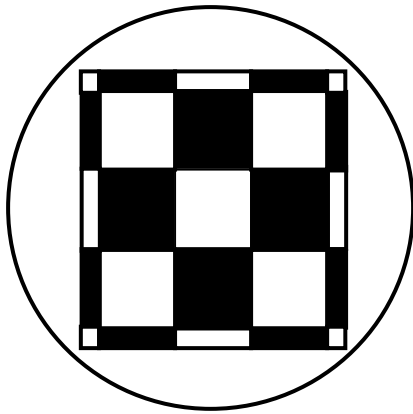


Рисунок 3.4. Геометрія чутливої поверхні піранометра.

Чорні квадратики повністю поглинають сонячну енергію і нагріваються сильніше за білі, які добре її відбивають. Різницю температур між ними вимірюють диференційними термопарами, які для підвищення чутливості з'єднані послідовно у термобатарею із декількох десятків термопар. Напруга термобатареї пропорційна різниці температур ΔT нагрітих і холодних спайів, а при встановленні термодинамічної рівноваги – інтенсивності потоку сонячної радіації G_b розрахованою за формулою

$$U \propto \Delta T = kG_b \quad \text{звідки} \quad G_b = kU \quad (1.1)$$

Коефіцієнт пропорційності k називають чутливістю приладу і наводять у його паспорті. Для запобігання запиленню та механічним пошкодженням, сприймаючу поверхню прикрито прозорим напівсферичним ковпачком (див. рис. 3.5).

За потреби чутливу головку піранометра можна встановити окремо для постійного моніторингу інтенсивності променистого потоку, наприклад сонячного або контролю розподілу освітленості поверхні фотомодуля. Бо вихідний сигнал термобатареї у мВ узгоджується з входом лабораторного регулятора вимірювача РТ-0102-8, який забезпечує його неперервну візуалізацію, реєстрацію та зв'язок з ПК для обробки даних.

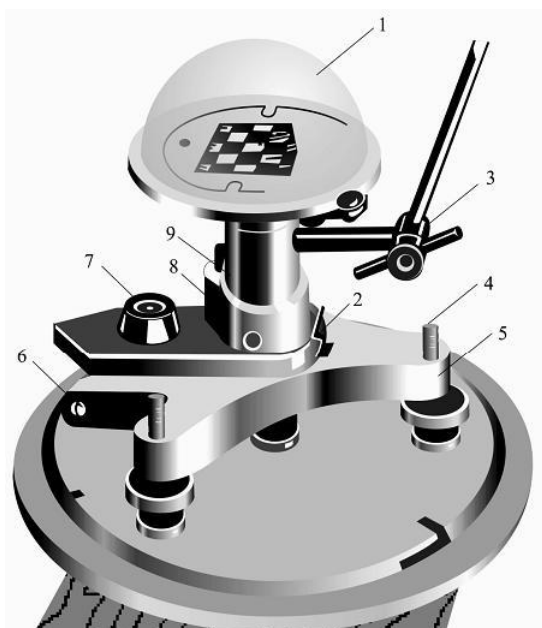


Рисунок 3.5 Загальний вигляд
піранометра для контролю енергії
світлового потоку

Восьмиканальний регулятор-вимірювач РТ-0102 (див. рис. 3.6) призначений вимірювання, архівування, індикації зміни вимірюваних величини для автоматичного реагування або керування відповідними технологічними процесами.



Рисунок 3.6 Зовнішній вигляд
регулятора-вимірювача РТ-0102 [12]

Прилад зв'язок з персональним комп'ютером через інтерфейсом RS232 або RS485 виконує функції регулювання за двома законами – двопозиційним та пропорційно-інтегрально-диференціальним (ПІД). Другий реалізується імпульсним вихідним сигналом з широтно-імпульсною модуляцією. Причому регулювання (сигналізація) відбувається по кожному із восьми каналів з спільною для всіх каналів сигналізацією – незалежні тільки уставки їх рівня.

Вихід РТ-0102 реалізується за різними варіантами:

- контактами електромагнітного реле потужністю 220 Вт при напрузі комутації 220 В частотою 50 Гц;
- оптосимістором з максимальним значенням комутованих напруги 600 В і струму 1 А;
- транзисторним ключем з максимальними значеннями комутованих напруг 300 В і струмів до 150 мА з відкритим колектором, гальванічно ізольованим від інших елементів схеми;

РТ-0102 працює в комплекті з первинними перетворювачами:

- термоперетворювачами опору з умовним позначенням номінальної статичної характеристики перетворення (НСХ) 50М, 100М, 50П, 100П (Pt100) ($W_{100}=1,391$ і $W_{100}=1,385$), Pt1000 і інші;
- Термопарами перетворювачами НСХ, ХА(К), ХК(Л) або ЗК(Ј);
- Радіаційним піранометром;
- перетворювачами з уніфікованим вихідним сигналом постійного струму 0-5 мА, 4-2 мА або 0-10 В.

На передній панелі РТ-0102 (див. рис. 3.7) розміщені цифрові індикатори для відображення номера каналу, виміряних значень температури і службових символів, вісім світло діодів для відображення стану вихідних каналів, два світло діода для відображення спільної для всіх каналів сигналізації і неполадки на виході, чотири кнопки для виставлення необхідних параметрів і режимів роботи РТ-0102:

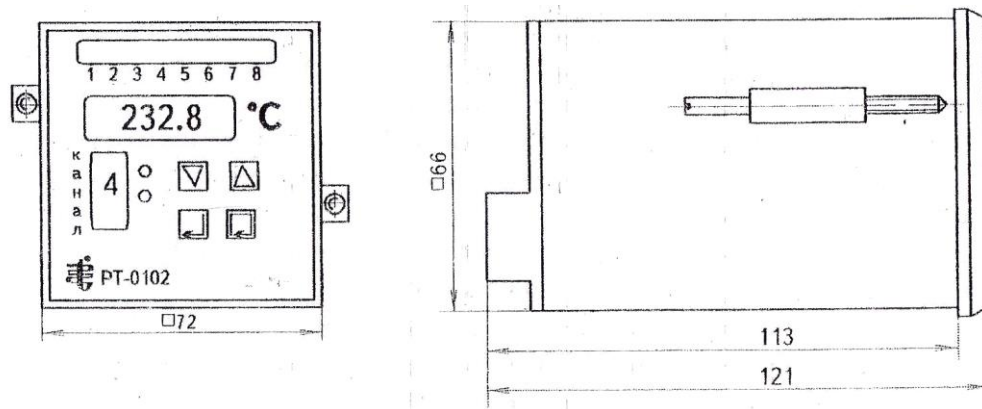


Рис.3.7. Зовнішній вигляд PT0102 з розмірними параметрами і клавішами керування з такими функціями: ,  - зміна (зменшення/збільшення) значень параметрів;  - перехід до наступного параметру;  - вихід в основний режим.

Основою PT-0102 є мікропроцесор, який разом з АЦП здійснює, вимірювання архівування, регулювання, сигналізацію і підтримує зв'язок з ПК через послідовний інтерфейс RS232 або RS485 трипровідною лінією. Прилад підтримує протокол MODBUS і видає по ньому всі параметри регулювання та архівування. Робота з приладом через ПК забезпечується за допомогою спеціальної програми *TPara8*, з можливістю знімати дані з приладу так і змінювати його уставки. Методика налаштування приладу детально описана у його технічній документації.

3.3 Схема та методика вимірювання темнових струмів фотомодуля

Темнові ВАХ будують за результатами вимірювання струму зовнішнього джерела через неосвітлений (повністю зашторений) фотомодуль. Якісному затемненню чутливої до світла поверхні фотомодуля відповідає відсутність фотоструму через у мікроамперметр, приєднаних його вихідних клем. Власне темновими називають струми, які протікають через фотомодуль від прикладеної до його клем напруги зовнішнього джерела. А прикладену напругу називають прямою, якщо полюси джерела і фотомодуля співпадають, і оберненою за їх протилежних знаків. Натомість темновий струм у першому

випадку називають зворотним (відносно напрямку фотоструму), а у другому навпаки – прямим (див. схеми комутації на рис. 2.5). Відтак у схему комутації між фотомодулем і зовнішнім джерелом живлення потрібно ввести перемикач полярності.

Темнові струми сонячних елементів і фотомодулів зазвичай досліджують у широкому діапазоні значень – від кількох мікроампер до десятка ампер. Для їх реєстрації у вимірювальну схему внесено перемикач між приладами з різними вимірювальними діапазонами. Струм короткого замикання досліджуваного фотомодуля не перевищує 650 мА тому для комутації струмів використовується один багатофункціональний цифровий прилад (див. рис. 3.2) з частковим перекриттям струмових діапазонів, зручним для ручного переносу комутаційного штекера між гніздами.

Малі темнові струм вимагають надійних контактів при їх комутації та високо стабільного джерела зовнішньої напруги. За його відсутності реалізовано живлення від акумулятора з плавним регулюванням прикладеної напруги реостатами лабораторного стенда. Відповідна схема комутації фотомодуля/сонячного елемента з джерелом зовнішньої напруги наведена на рис. 3.8 разом з вимірювальними приладами. Додатковий перемикач внесено для перемикання полярності мікро та міліамперметра.

Проект реалізовано у вигляді діючого макета, зібраного на столі вимірювального стенда з реальними вимірювальними та допоміжними засобами. Макет ілюстрований фотографією, наведеною на рис. 3.4, та схемою його комутації на рис. 3.8. Так укомплектований лабораторний стенд за технічними характеристиками його складових елементів відповідає вимогам для вимірювання темнових ВАХ фотомодулів більшої площі і потужності.

Задля безпечного використання стенда у навчальному процесі його металевий каркас потрібно обов'язково заземлити. А металеві корпуси або гнізда заземлення чутливих електронних вимірювальних приладів пр'єднати до спільної точки на стенді для мінімізації природних шумів у вимірювальних колах та запобігання електромагнітним завадам.

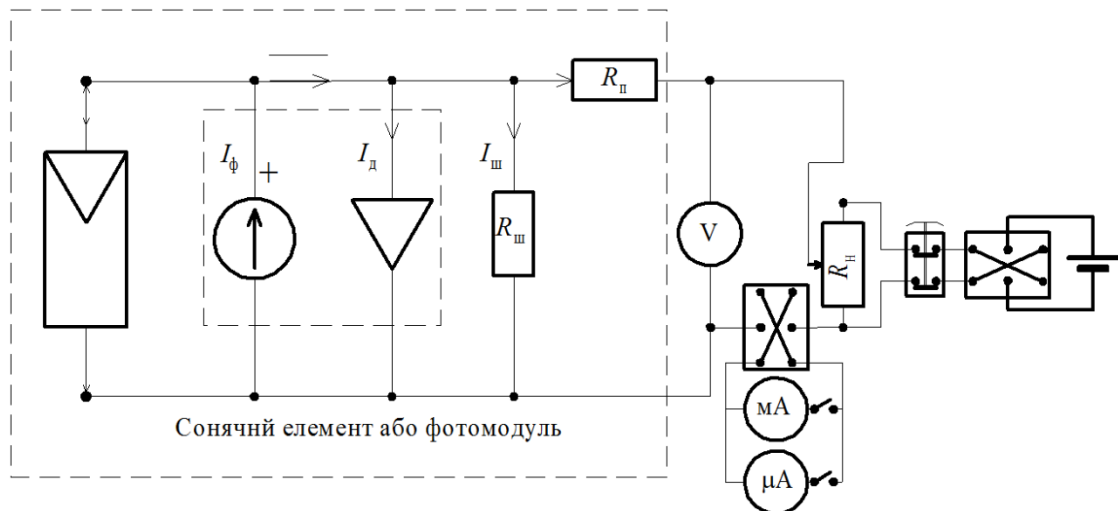


Рисунок 3.8. Схема для вимірювання темнових ВАХ з вузлом живлення та перемикачем його полярності.

3.3 Результати тестування розробленого стенда

За надійного затемнення фотомодуля, стабільність параметрів його темнових характеристик залежать тільки від його температури прикладеної напруги. Особливо акуратно потрібно проводити вимірювання в області малих струмів, що вимагає додаткового часу на врівноваження показів цифрових приладів або їх повторення. Натомість в області великих струмів час тривалість вимірювань скорчується. Тому для запобігання додатковому нагріванню фотомодуля і відповідного спотворення вольтамперної характеристики, процес потрібно вимірювання починати з малих струмів та обмежувати його тривалість.

За виключенням часу на підготовку дослідження, усі процедури зводяться до ручного пересування повзунків реостатів з однаковим кроком зміни прикладеної напруги через кожні 0,5 В, зчитування та реєстрації показів двох приладів – вольтметра та амперметра. Посередині процесу слід перемкнути діапазон вимірювання з мікроамперного на міліамперний. Результати тестового вимірювання наведені у таблиці 3.1 а відповідні їм графічні залежності побудовані на рис. 3,9, 3,10 і 3,11.

Таблиця 3.1

Результати вимірювання прикладених напруг і темнових струмів

$U_{пр}, В$	$I_{зв} мкА$	$\ln I_{зв}$	$U_{пн}, В$	$I_{пр} мкА$	
Напруга прямої полярності Напряв струму – зворотний			Напруга протилеж. полярності Напряв струму прямий		
1	0,005	-5,29832	0,5	15	
1,5	0,013	-4,34281	1	26	
2	0,03	-3,50656	1,5	32	
2,5	0,05	-2,99573	2	35	
3	0,08	-2,52573	2,5	41	
3,5	0,11	-2,20727	3	46	
4	0,14	-1,96611	3,5	52	
4,5	0,19	-1,66073	4	58	
5	0,263	-1,3356	4,5	63	
5,5	0,32	-1,13943	5	68	
6	0,37	-0,99425	5,5	74	
6,5	0,44	-0,82098	6	78	
7	0,511	-0,67139	6,5	85	
7,5	0,58	-0,54473	7	90	
8	0,675	-0,39304	7,5	95	
8,5	0,78	-0,24846	8	100	
9	0,9	-0,10536	8,5	107	
9,5	1,004	0,003992	9	115	
10	1,18	0,165514	9,5	120	
10,5	1,25	0,223144	10	127	
11	1,55	0,438255	10,5	130	
11,5	1,695	0,527683	11	138	
12	1,975	0,680568	11,5	145	
12,5	2,35	0,854415	12	150	
13	2,7	0,993252	12,5	158	
13,5	3,12	1,137833	13	166	
14	3,7	1,308333	13,5	173	
14,5	4,36	1,472472	14	180	
15	4,934	1,59615	14,5	185	
15,5	6,65	1,894617	15	195	
16	8,5	2,140066	15,5	200	
16,5	10,5	2,351375	16	210	
17	15	2,70805	16,5	216	
17,5	18,9	2,939162	17	223	
18	26,6	3,280911	17,5	230	
18,5	39	3,663562	18	237	
19	59	4,077537			
19,5	85	4,442651			
20	125	4,828314			

Продовження таблиці 3.1

20,5	176	5,170484			
21	245	5,501258			
21,5	328	5,793014	$R_{\pi}=1,75 \text{ Ом}$		
22	420	6,040255			

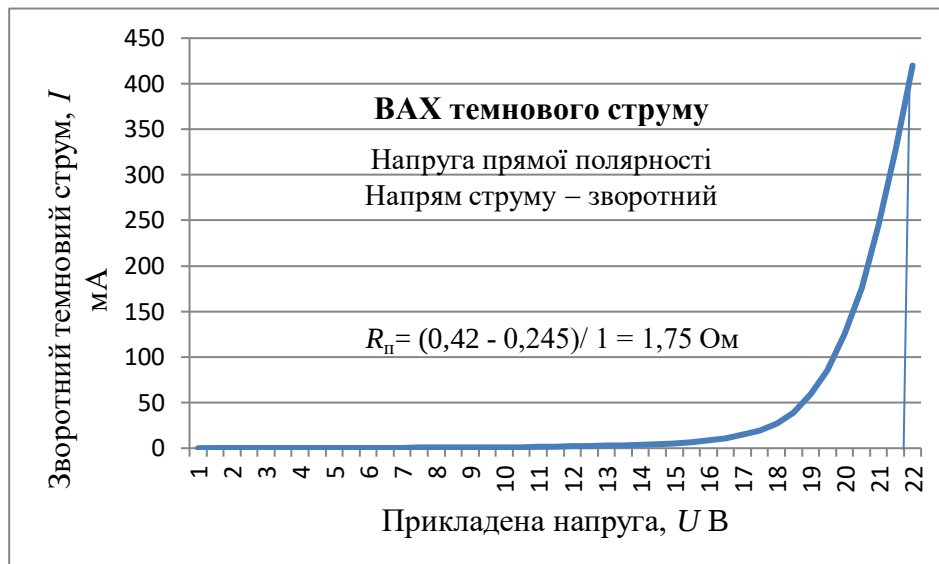


Рисунок 3.9. Темнова ВАХ фотомодуля за результатами вимірювання зворотного струму від прикладеної напруги прямої полярності

Темнова ВАХ фотомодуля за прямої полярності прикладеної напруги і зворотному напрямку струму відповідає моделі ідеального планарного фотодіода [2, 13]. Але графічне зведення в одному масштабі величини, мінімальне і максимальне значення яких відрізняється майже у мільйон разів (на шість порядків) малоінформативне. Тоді як параметри внутрішніх елементів заступної схеми сонячного елемента чи фотомодуля – шунтового і послідовного опорів, визначають за їх крайніми кутами нахилу ВАХ, а ступінь їх досконалості – за її середньо ділянкою. Наочне представлення про ці інформативні інтервали зазвичай отримують з ВАХ, представлених на наступному рис. 3.10 у напівлогарифмічній системі координат.

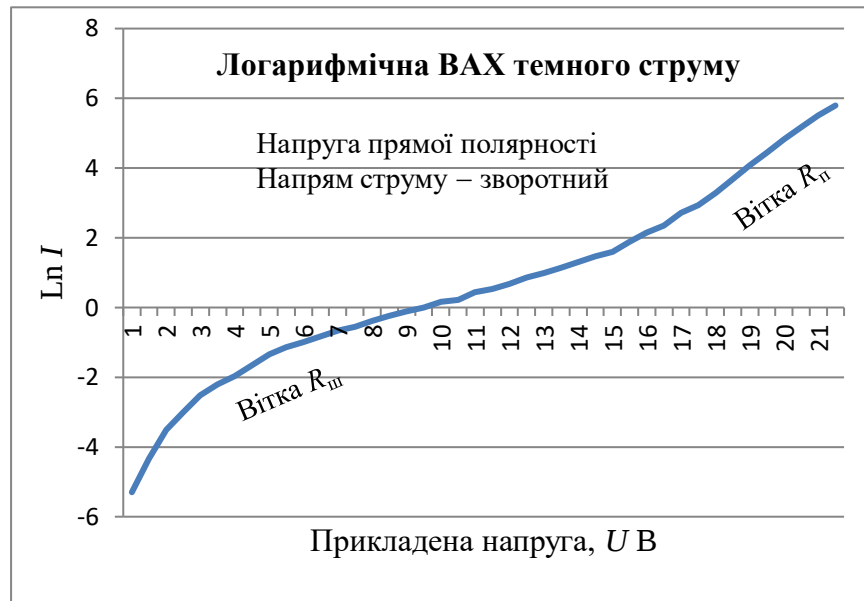


Рисунок 3.10 Темнова ВАХ фотомодуля від прикладеної напруги прямої полярності

Лінійні крайні вітки відповідають межах інформативних інтервалів показника досконалості та послідовного опору. Тоді для кількісної оцінки шунтового опору потрібно додатково побудувати темнову ВАХ від прикладеної напруги протилежної до фотомодуля полярності (див. рис. 3.11) за параметрами якою визначають $R_{ш}$ та нульове значення темного струму I_0 .

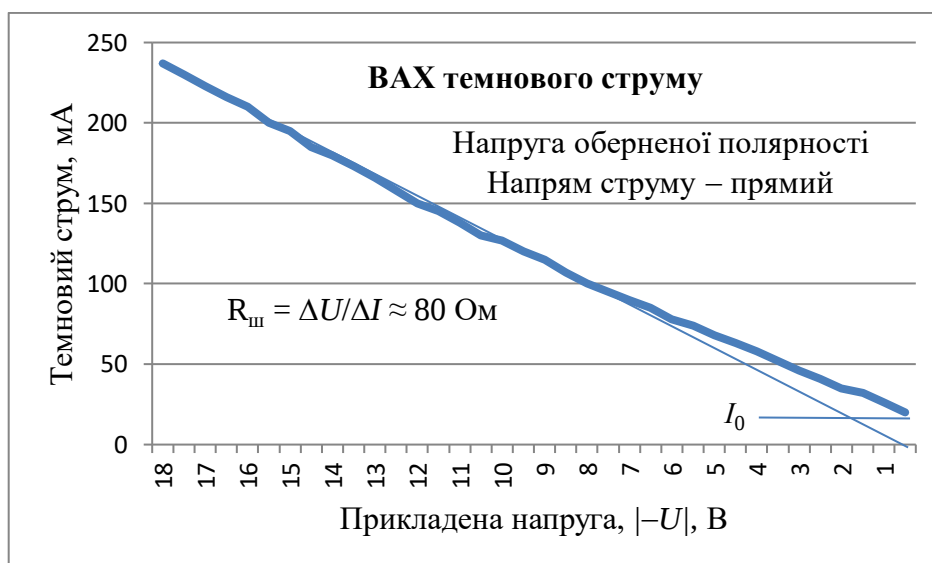


Рисунок 3.11. Темнова ВАХ фотомодуля від прикладеної напруги протилежної полярності

Верхня частина графіка відповідає ВАХ активного опору, у вигляді прямої лінії, проведеної від початку координат до точки максимального значення темного струму. Тоді як його нижня частина відхиляється вверх внаслідок додавання малого струму термостимульованих зарядів I_0 , дрейфуючих паралельно темновому струму в електричному полі прикладеної напруги. Але його відносна частка у сумарному струмі поступово (асимптотично) спадає із зростанням основної лінійної складової темного струму.

Усі графічні ілюстрації виконані засобами графічного редактора програмного середовища Ексель за результатами однократного вимірювання поточних струмів і напруг з попереднім виправленням одиничних випадкових відхилень до їх найімовірніших значень.

Розділ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Безпека роботи з фотоелектричними установками

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 поводження 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.

4.2 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 клемами 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 клемах.

4.3 Потенційні загрози довкіллю

Серед усіх компонентів фотоелектричних установок довкіллю загрожують тільки акумулятори електроенергії. Вони мають шкідливі речовини, які за неправильної утилізації можуть призвести до забруднення ґрунту, води та повітря, негативно впливаючи на здоров'я людей і тварин. Тому масивні токсичні елементи конструкції акумулятора елементи свинець, кислоти та інші вимагають особливого підходу під час утилізації. Використані акумулятори не можна викидати разом з побутовими відходами, бо наявні в них хімічні речовини можуть потрапити до ґрунту і водних джерел. А при їх нагріванні вони можуть виділяти токсичні гази та речовини у повітря. З метою запобігання таким явищам, на законодавчому рівні у точках роздрібного продажу організовують обмін відпрацьованих акумуляторів на нові.

Для підприємців, які в установленому порядку своєчасно не передали на утилізацію відпрацьовані акумулятори, навіть передбачена адміністративна відповідальність у вигляді штрафу від одного до трьох неоподатковуваних мінімумів доходів громадян, а на посадових осіб - від п'яти до десяти неоподатковуваних мінімумів доходів громадян.

5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Лабораторний стенд призначений для забезпечення навчального процесу з курсу відновлюваної енергетики. Зокрема для виконання лабораторної роботи з дослідження енергетичних характеристик сонячних панелей потужністю до 100 Вт – параметрів хх світлових вольт амперних та вольтватних характеристик. На практиці за ними достовірно визначали тільки три точкові параметри фотомодулів – струм короткого замикання, напругу холостого ходу і точку максимальної потужності P_{mpp} з її координатами струмом I_m та напругою U_m .

Променисту енергію Сонця імітують світлом лампи розжарювання, спектр випромінювання якої нагадує сонячний тільки за формою. Навіть за його загальної інтенсивності у 800 Вт/м^2 близької до її значення за стандартом випробування NOCT, проміжні значення ВАХ значно спотворені від нагрівання фотомодуля значно вищою інфрачервоною складовою випромінювання лампи. При такій якості світлового потоку практично неможливо отримувати достовірні проміжні значення ВАХ, за якими обчислюють внутрішні опори фотомодуля – шунтовий і послідовний. Останні необхідні для виконання практичних завдань з моделювання енергетичних характеристик фотомодулів у реальних умовах їх експлуатації з довільними значеннями освітленості і температури довкілля.

Розроблений варіант доукомплектації наявного стенда досконалішими вимірювальними засобами дозволяє визначати внутрішні опори фотомодулів за темновими вольт амперними характеристиками при мінімальних затратах на обладнання. Зокрема обійтися доступними джерелами променистої енергії без значних термінових затрат на розробку сонячного імітатора. Одночасно впровадити у навчальний процес нового для університету напрямку підготовки фахівців з відновлюваної енергетики. Таким чином економічний ефект від розробки дипломного проекту можна оцінити лише на опосередковано за рівнем знань показниками якістю підготовки фахівців та перспективами практичного використання розробленої методики.

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

1. Розроблено електричну схему вимірювання темнових струмів сонячних панелей та обґрунтовано комплектацію обладнання за їх метрологічними та енергетичними характеристиками.

2. Складено макет оновленого лабораторного стенду для реалізації методики вимірювання темнових струмів фотомодулів.

3. Проект розширення вимірювальних можливостей діючого лабораторного стенду передбачає використання тільки наявних у лабораторії багатофункціональних вимірювальних засобів і мінімальних затрат на виготовлення допоміжних без залучення додаткових бюджетних коштів.

4. Контрольні вимірювання тіньових вольт амперних характеристик фотомодуля підтвердили їх відповідність наведеним у літературі типовим енергетичним параметрам та залежностям.

5 Методику вимірювання пропонується впровадити у навчальний процес для студентів спеціальності 145 – «Відновлювані джерела енергії та гідроенергетика» у якості методичних рекомендацій для виконання лабораторних робіт з фотоенергетики.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Гальчак В.П., Боярчук В.М. Альтернативні джерела енергії. Енергія Сонця. – Львів: вид. ЛНАУ, 2008 – 135 с.
2. Гаєвський О. Ю. Фотоенергетика. Частина І. Сонячна радіація і фотоелектричні модулі [Електронний ресурс] підручник / О. Ю. Гаєвський. Київ: КПІ імені Ігоря Сікорського, 2023. – 150 с.
3. Суровицький М. Ю. Дослідження вольт-амперної характеристики р-п-переходу засобами моделювання в LabVIEW. Електронний ресурс. <https://lecturedsumdu.blob.core.windows.net/nodes/8463/70fc041e-4d3a-11ec-81bc-005056827921/%D0%9B%D0%B18.pdf> Дата звернення 11.06. 2025 р.
4. Klaus Jäger, et. al. Solar Energy. Fundamentals, Technology, and Systems. Copyright Delft University of Technology, 2014.
5. Колтун М.М. Оптика и метрологія сонячних елементів. – М.: Наука, 1985. – 280 с.
6. Дослідження роботи фотоелектричного модуля [Текст]: Метод. вказівки до виконання лабораторної роботи для студентів спеціальності «Теплоенергетика»/Уклад: В.В. Дубровська, В.І. Шкляр, В.В. Задвернюк – К.: НТУУ «КПІ», 2017. – 32 с.
7. «Фотоенергетика: лабораторний практикум» [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ;уклад.: О.Ю. Гаєвський, В.Ю. Іванчук – Електронні текстові дані (1 файл: 3 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 41 с. Режим доступу <https://ela.kpi.ua/items/fd64be8d-c921-4e63-a6eb-461b4cf14170/full> Дата звернення 15.05.2025 р.
8. Електронний ресурс: «Дослідження фотоелектричних перетворювачів за допомогою апаратно-програмних платформ Arduino». Режим доступу: <https://ezpf.elit.sumdu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/03/Photon-1.pdf>]. Дата звернення 15.05. 2025 р.

9. Бекиров Э.А. Нелінійні коливання у системі «фотобатарея – активно-реактивне навантаження». – Відроджувана енергетика.2005, №2, с. 26-30.
10. Сонячні модулі JA Solar. Електронний ресурс. Режим доступу www.jasolar.com Дата звертання 6.03.2025 р.
11. Божко К.М., Мушкет К.Я. Електронний ресурс: Безконтактний метод вимірювання шунтового опору окремих сонячних елементів у складі панелі режим доступу[DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-174-181](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-174-181)] Дата звернення 16.05. 2025 р.
12. Електронний ресурс: «Регулятор-вимірювач температури РТ-0102». Режим доступу <https://thermo.lviv.ua/ru/product/regulatory-vymiryuvachi-typu-rt-0102-rt-0102s-nastinnyj-variant-rt-0102din-na-din-rejku/> Дата звернення 16.06.2025 р.
13. Електронний ресурс: Stuart Bowden and Christiana Honsberg work at the Solar Power Labs at ASU. Режим доступу (<http://pv.asu.edu/>) Дата звернення 16.06.2025 р.