

С.В. Коробка¹ [0000-0002-4717-509X], М.М. Толстушко² [0000-0001-9230-3831],
І.Г. Стукалец¹ [0000-0001-7107-4865], І.О. Дудко¹, Н.О. Толстушко² [0000-0001-8811-7868]

Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій
імені С.З. Гжицького¹

Луцький національний технічний університет²

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СВІТЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ

У статті наведено результати дослідження світлових вольт-амперних характеристик фотоелектричного модуля 615 Вт Longi Solar LR8-66HGD-615M в умовах різної інтенсивності освітлення. Виконано аналіз впливу сонячного випромінювання на ключові електричні параметри модуля, зокрема напругу холостого ходу, струм короткого замикання та вихідну потужність. Досліджено особливості зміни характеристик фотоелектричного модуля залежно від режимів його роботи. Отримані результати можуть бути застосовані для вдосконалення режимів експлуатації фотоелектричних систем і підвищення ефективності перетворення сонячної енергії.

Ключові слова: фотоелектричний модуль, сонячна панель, вольт-амперна характеристика, ВАХ, сонячна енергетика, відновлювані джерела енергії, освітленість, струм короткого замикання, напруга холостого ходу, максимальна потужність, коефіцієнт корисної дії.

S. Korobka, M. Tolstushko, I. Stukalets, I. Dudko, N. Tolstushko

EXPERIMENTAL STUDY OF THE LIGHT CHARACTERISTICS OF A PHOTOVOLTAIC MODULE

The article presents the results of an investigation of the light current-voltage characteristics of a photovoltaic module 615 W Longi Solar LR8-66HGD-615M under different levels of irradiance. The influence of solar radiation on the key electrical parameters of the module, including open-circuit voltage, short-circuit current, and output power, is analyzed. The features of changes in the photovoltaic module characteristics depending on its operating modes are studied. The obtained results can be used to improve the operating regimes of photovoltaic systems and to increase the efficiency of solar energy conversion.

Keywords: photovoltaic module, solar panel, current-voltage characteristic, I-V curve, solar energy, renewable energy sources, irradiance, short-circuit current, open-circuit voltage, maximum power, efficiency coefficient.

Постановка проблеми. У процесі тривалої експлуатації сонячних панелей відбувається поступове зниження їхньої продуктивності, що пов'язано з природною деградацією напівпровідникових матеріалів. Зазвичай виробники гарантують збереження близько 80 % початкової потужності фотомодулів після 20 років роботи, однак перші сонячні електростанції України вже досягли цього експлуатаційного терміну. Це зумовлює необхідність проведення оцінювання технічного стану фотоелектричних модулів, модернізації існуючих систем та заміни елементів, які втратили свої експлуатаційні характеристики.

Ефективність роботи фотоелектричних установок значною мірою залежить від відповідності параметрів окремих сонячних панелей між собою, оскільки навіть один несправний або деградований модуль може призвести до помітного зниження енергетичних показників усієї системи. У зв'язку з цим особливої актуальності набувають питання контролю технічного стану фотомодулів, проведення їх періодичного моніторингу та визначення фактичних вольтамперних і енергетичних характеристик. Результати таких досліджень дозволяють обґрунтувати доцільність заміни окремих панелей або переукомплектації фотоелектричних установок модулями з близькими параметрами.

Складність виконання контролю та оцінювання ефективності сонячних панелей полягає у впливі значної кількості зовнішніх факторів, серед яких температура навколишнього середовища, рівень сонячної інсоляції, режими навантаження та інші змінні умови експлуатації. Тому виникає потреба у вдосконаленні методів діагностики та створенні спеціалізованих вимірювальних стендів, які забезпечують можливість приведення контрольованих параметрів до стандартних умов вимірювання.

Актуальність дослідження також обумовлена активним розвитком сонячної енергетики в Україні, збільшенням частки відновлюваних джерел енергії у структурі електрогенерації та реалізацією державної енергетичної стратегії щодо підвищення рівня енергоефективності та енергетичної безпеки. Розвиток галузі стимулює впровадження нових технологій, удосконалення конструкцій фотомодулів, підвищення їх коефіцієнта корисної дії та розширення наукових досліджень у сфері моніторингу й оптимізації роботи сонячних електростанцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В Україні активно проводяться наукові дослідження у сфері сонячної енергетики, зокрема в НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», де з 2017 року впроваджуються сонячні панелі для забезпечення корпусів університету електроенергією та використання їх у науково-дослідній роботі студентів. Подібні дослідження здійснюються і в Національний університет біоресурсів і природокористування України, де розглядаються методи підвищення максимальної потужності сонячних електростанцій із застосуванням технологій штучного інтелекту та систем сонячного трекінгу. Крім того в Львівському національному університеті ветеринарної медицини та біотехнологій є наявний навчальний вимірювальний стенд призначений тільки для демонстраційного зняття світлових вольт-амперних характеристик невеликих за розміром фотомодулів у межах поля рівномірної освітленості розміром 60×60 см. Його вимірювальна схема відповідає наведеній на рис. 1.1.

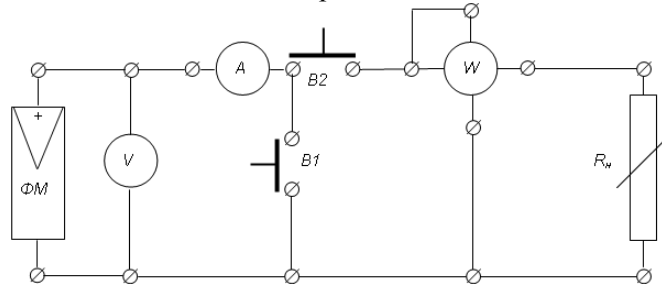


Рис. 1. Стендова схема вимірювання навантажувальних вольт-амперних характеристик сонячного модуля

При ввімкненому вимикачі B1 реалізується режим короткого замикання фотомодуля, при вимкнених B1 і B2 – режим холостого ходу, а режими навантаження забезпечуються ввімкненням вимикача B2, при цьому для зменшення похибок використовуються цифрові вимірювальні прилади з низьким власним енергоспоживанням [1]. Світлову вольт-амперну характеристику фотомодуля визначають шляхом вимірювання струму та напруги на змінному навантаженні, однак під час лабораторних досліджень було виявлено нестабільність результатів у режимах, близьких до короткого замикання та холостого ходу, що пов'язано з нестабільністю світлового потоку, нагріванням фотомодуля та недосконалістю регулювання опору навантаження [2]. Для підвищення точності вимірювань доцільно використовувати декілька реостатів із системою комутації, а також забезпечити стабілізацію освітленості фотомодуля шляхом живлення лампи розжарювання стабілізованим струмом, наприклад від акумуляторної батареї через інвертор. Крім того, під час опромінення фотомодуля необхідно контролювати його температуру, оскільки нагрівання спричиняє зміщення вольт-амперної характеристики та точки максимальної потужності, тому температуру вимірюють термпарою, закріпленою на тильній поверхні фотомодуля, з реєстрацією сигналу цифровим мілівольтметром [3]. Незважаючи на розроблення електричної схеми вимірювання темнових струмів сонячних панелей та створення модернізованого лабораторного стенду, існуючі методики дослідження фотомодулів мають ряд недоліків, пов'язаних з обмеженими функціональними можливостями вимірювального обладнання, недостатньою автоматизацією процесу вимірювання та залежністю результатів від зовнішніх умов експерименту. Використання наявних лабораторних приладів без спеціалізованих систем стабілізації та обробки даних може призводити до похибок під час визначення темнових вольт-амперних характеристик, що ускладнює отримання високоточної інформації про реальний технічний стан фотомодулів. Крім того, обмежене фінансування та необхідність використання переважно наявної матеріально-технічної бази стримують подальше вдосконалення лабораторного стенду та розширення його вимірювальних можливостей.

В роботі [6] на рис. 2 показано, що від'ємна ділянка фотоструму відповідає зворотному включенню фотодіода, тоді як додатна – його прямому зміщенню. Таким чином, повна вольт-амперна характеристика складається з двох основних складових: темної (dark) та світлової (illuminated), які зміщені одна відносно одної вздовж осі струму.

Темнові ВАХ фотодіода і сонячного елемента отримують при подачі на їх вихідні клеми зовнішньої напруги відповідної полярності, тоді як світлові характеристики визначають за відсутності прикладеної напруги, але за наявності фотогенерації струму та напруги при освітленні, причому при переході напруги через нуль змінюються напрям струму та полярність.

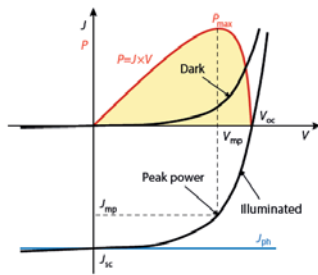


Рис. 2. Темнова і світлова ВАХ p - n переходу у двох системах координат, зміщених по осі струму

При малих опорах навантаження фотоелемент працює в режимі, близькому до короткого замикання ($I_n \rightarrow I_{кз}$), а при великих опорах — наближається до режиму холостого ходу ($U_n \rightarrow U_{xx}$), при цьому його ВАХ визначається різницею між фотогенерованим струмом і струмом заступного діода, що відображає перехід від режиму ідеального джерела струму до ідеального джерела напруги (рис. 3) [6].

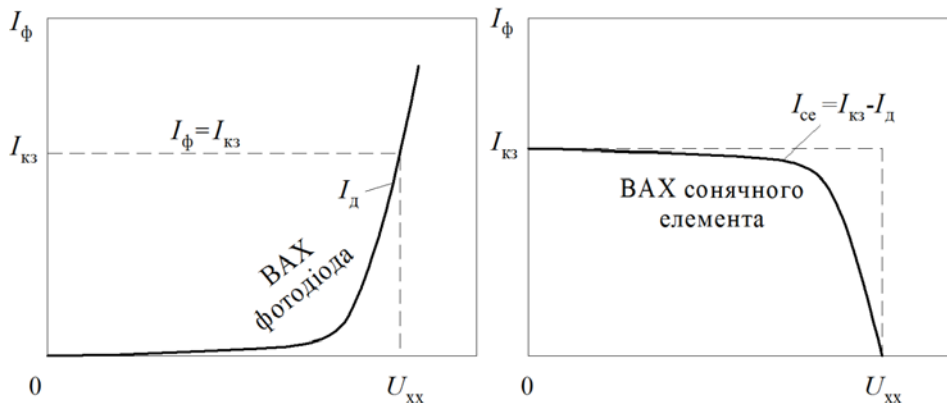


Рис. 3. Утворення ВАХ ідеального сонячного елемента накладанням протилежних струмів фотодіода та ідеального джерела струму [6]

У науковій літературі складові повної вольт-амперної характеристики сонячного елемента зазвичай подають у вигляді графіків у чотирьох квадрантах координатної системи (рис. 4 [7]), де за початок відліку струму та напруги приймають стан відсутності різниці потенціалів між вихідними клемми фотоелемента.

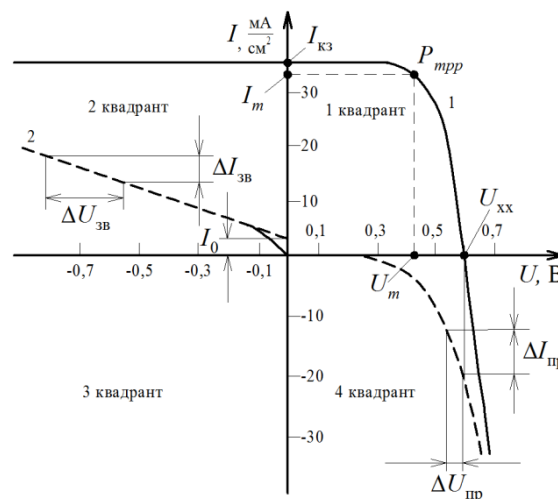


Рис. 4. Повна ВАХ сонячного елемента з ілюстрацією визначення його внутрішніх опорів

Представлена таким чином ВАХ сонячного елемента є узагальнюючим параметром для оцінювання його енергетичних, світлових і темнових характеристик, на основі яких виконують розрахунок параметрів як окремих елементів, так і сонячних панелей, проте її складність ускладнює сприйняття та інтерпретацію нефахівцями, зокрема під час експлуатації фотоенергетичних установок у реальних умовах. Для забезпечення коректного проведення вимірювань і формування

практичних рекомендацій розробляються спеціальні навчальні матеріали з додатковими вимогами до достовірності результатів. Світлові характеристики сонячних елементів описують залежність струму від напруги в режимі резистивного навантаження за різних рівнів освітлення та температури, при цьому робочі параметри суттєво залежать від великої кількості зовнішніх і конструктивних факторів. Тому режими роботи сонячних батарей визначають на основі експериментально отриманих вольт-амперних характеристик (ВАХ) при різних значеннях світлового потоку Φ , повного потоку сонячної енергії G та температури поверхні T .

Фотострум I_Φ ідеального сонячного елемента, фотонапруга U_Φ , темновий струм I_s та навантажувальні параметри – напруга U_n і струм I_n , взаємно пов'язані такими співвідношеннями:

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

$$I_\Phi = I_n - I_s \left(e^{\frac{qU_n}{kT}} - 1 \right); \quad (2)$$

$$U_n = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_\Phi - I_n}{I_s} + 1 \right); \quad (3)$$

Другий доданок залежності (2) називають **темною** характеристикою сонячного елемента

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{qU_n}{kT}} - 1 \right) \quad (4)$$

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 діода, який враховує різні механізми перенесення носіїв заряду через р–п перехід, при цьому $A=1$ відповідає переважанню дифузійного процесу, а при $A \approx 2$ домінує рекомбінаційний механізм в області виснаження. Темновий струм є еквівалентним струму діода при прямому зміщенні напруги за відсутності освітлення та відіграє роль, що врівноважує фотогенерований струм у процесах рекомбінації електронів і дірок. Під час рекомбінації енергія може виділятися у вигляді випромінювання фотонів або переходити в теплову енергію, нагріваючи кристалічну ґратку напівпровідника. У заступній схемі ідеального фотоелемента (див. рис. 4) темновий струм моделюється обернено ввімкненим діодом, який одночасно визначає полярність напруги джерела фотоструму.

Аналіз сучасних наукових публікацій показує, що фізичний опис роботи сонячних елементів базується на моделі р–п переходу, в якій вольт-амперна характеристика (ВАХ) формується як сума темної діодної складової та фотогенерованого струму. Встановлено, що форма ВАХ визначається механізмами перенесення носіїв заряду, параметром ідеальності діода та рекомбінаційними процесами, які враховуються через моделі темного струму. Дослідження також підтверджують тісний взаємозв'язок світлових і темнових характеристик, що дозволяє здійснювати комплексну оцінку енергетичних параметрів фотоелектричних елементів і модулів у різних режимах їх роботи.

Водночас показано, що зовнішні фактори, зокрема освітленість, температура та режим навантаження, суттєво впливають на відхилення реальних характеристик від ідеалізованих моделей, ускладнюючи інтерпретацію експериментальних результатів.

Таким чином, сучасні підходи до аналізу ВАХ передбачають поєднання теоретичних напівпровідникових моделей із експериментальними методами вимірювання, що забезпечує підвищення точності та достовірності оцінювання параметрів фотоелектричних систем.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення точності та достовірності вимірювання вольт-амперних характеристик сонячних елементів шляхом удосконалення методики та лабораторного стенду для дослідження їх темнових і світлових режимів роботи. Для досягнення поставленої мети необхідно розробити електричну схему вимірювання темнових струмів фотомодулів, обґрунтувати вибір вимірювального обладнання за метрологічними та енергетичними параметрами, а також створити макет модернізованого лабораторного стенду. Окремим завданням є забезпечення можливості проведення вимірювань у різних режимах роботи фотомодуля (коротке замикання, холостий хід та навантаження) з мінімізацією впливу зовнішніх факторів і похибок вимірювання. Також необхідно перевірити працездатність розробленого стенду шляхом експериментального отримання вольт-амперних характеристик та порівняння їх із типовими літературними даними.

Виклад основного матеріалу. Сонячні модулі зазвичай складаються з багатьох сонячних елементів, у яких відбувається перетворення енергії випромінювання у електричну. Сонячний

елемент, як первинний перетворювач енергії, виготовляється у вигляді тонкої пластини (товщиною близько 0,3 мм) кристалічного кремнію розміром 100×100 мм, у яку методом термодифузії вводяться донорні (n) та акцепторні (p) домішки через обидві поверхні. У результаті в різних частинах кристалу формуються області з рухливими електронами та дірками, тоді як нерухомі заряди залишаються на домішкових атомах (рис. 5). При контакті донорного та акцепторного кристалів відбувається природне вирівнювання концентрацій рухомих зарядів, подібне до дифузії газів у спільному об'ємі.

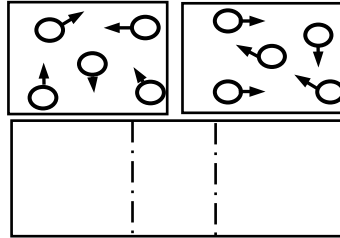


Рис. 5. Схема просторового розділення зарядів та утворення р-п переходу при контакті донорного та акцепторного напівпровідників

У результаті розділення зарядів у р-п переході виникає контактна різниця потенціалів U_k , а у вузькій перехідній області формується електричне поле, яке перешкоджає подальшій дифузії носіїв заряду. При освітленні кристалу утворюються фотостимульовані електронно-діркові пари, які в області р-п переходу розділяються, зменшуючи контактну різницю потенціалів до значення U_{oc} , тоді як пари, що виникають поза переходом, рекомбінують і не впливають на потенціал. За наявності зовнішніх металевих контактів і замикання клем через провідник (рис. 6, а) рух зарядів може відбуватися в обхід р-п переходу, що електрично еквівалентно схемі з двома паралельними гальванічними елементами (рис. 6, б). Навіть за відсутності освітлення в сонячному елементі протікає темновий струм I_S , зумовлений термогенерованими носіями заряду, який зростає зі збільшенням температури кристалу. Темновий струм зменшує ефективне значення контактної різниці потенціалів і впливає на робочі характеристики фотоелемента.

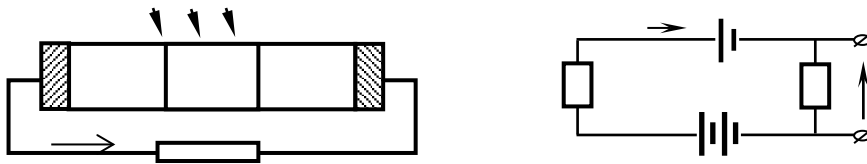


Рис. 6. Структурна (а) та функціональна (б) схеми сонячного елемента

Фото-електрорушійною силою E_ϕ або фотонапругою U_ϕ називають різницю потенціалів між освітленим та неосвітленим р-п переходами, що виникає внаслідок фотогенерації та розділення носіїв заряду в області просторового заряду.

$$E_\phi \equiv U_\phi = U_k - U_{oc}, \quad (5)$$

Під час освітлення кристалу при замкненому зовнішньому колі між металевими контактами та р-п переходом виникає фотострум I_ϕ , який відновлює порушену світлом рівновагу розподілу зарядів. Ключові характеристики фотоелектричного перетворювача – фотонапруга U_ϕ , фотострум I_ϕ , темновий струм I_S та заряд електрона e – утворюють взаємопов'язану систему параметрів, що визначається також впливом температури як зовнішнього фізичного фактора.

$$U_\phi = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_\phi}{I_S} + 1 \right). \quad (6)$$

На рис. 7 наведено заступну електричну схему сонячного елемента з підключеним зовнішнім навантаженням.

Діод, включений у заступну схему, визначає полярність сонячного елемента та напрям темного струму I_S . Шунтовий опір $R_{ш}$ моделює паразитні струми витоку через р-п перехід, зокрема в області виходу переходу на поверхню напівпровідникової пластини. Послідовний опір втрат R_v враховує сумарний опір об'єму напівпровідника, перехідної області р-п переходу та контактних з'єднань, і за фізичним змістом відповідає внутрішньому опорі гальванічного джерела.

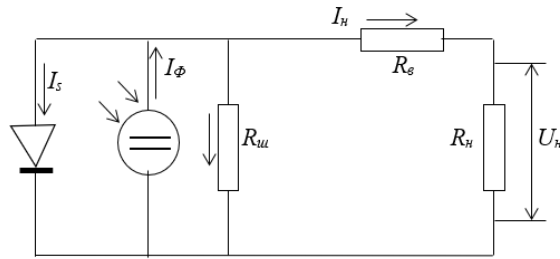


Рис. 7. Заступна електрична схема фотоелектричного модуля

При підключенні навантаження R_n напруга на клеммах U_n і струм I_n визначаються взаємозв'язаними електричними співвідношеннями, що описують режим роботи сонячного елемента.

$$U_n = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_{\phi} - I_n}{I_s} + 1 \right); \quad I_n = I_{\phi} - I_s \left(e^{\frac{eU_n}{kT}} - 1 \right). \quad (7)$$

Для математичного моделювання в дослідженні використано прикладний програмний пакет Matlab, а побудова нейронних мереж виконувалась у середовищі Matlab Simulink із застосуванням відповідних бібліотек моделювання фотоелектричних систем, при цьому поєднано емпіричні методи (опис, вимірювання, експеримент та порівняння) і теоретичні підходи, зокрема формалізацію фізичних процесів у сонячних елементах у вигляді математичних моделей. Моделювання роботи сонячних панелей виконано для типових умов експлуатації, де досліджено вплив температури в діапазоні 25–70 °C та рівня сонячної інсоляції 600–1000 Вт/м² на вольтамперну характеристику (ВАХ) і вихідну потужність, що підтвердило зниження ефективності зі зростанням температури та зменшенням освітленості.

Отримані результати (рис. 8.а, 8.б) демонструють зміну положення точки максимальної потужності $P_{\text{мрр}}$ (maximum power point) і характерну деформацію ВАХ та кривої потужності, що узгоджується з фізичними закономірностями роботи кремнієвих сонячних елементів. Встановлено, що графіки ВАХ будуються за результатами вимірювання струму та напруги на клеммах зовнішнього навантаження R_n , при цьому визначаються ключові параметри $I_{\text{кз}}$, $U_{\text{хх}}$ ($U_{\text{нх}}$) та $P_{\text{мрр}}$. У технічній документації сучасних фотомодулів результати наводяться для стандартних умов STC (1000 Вт/м², AM1,5, 25 °C), тоді як реальні умови описуються стандартами NOCT та NMOT, що враховують підвищену робочу температуру та знижену інсоляцію. Для коректного порівняння експериментальних і паспортних характеристик необхідно максимально точно відтворювати стандартні умови випробувань і стабілізувати освітленість та температуру фотомодуля, оскільки саме ці фактори визначають основні похибки вимірювань.

Згідно з поставленим завданням, виконано адаптацію існуючого лабораторного стенда для вимірювання темнових вольтамперних характеристик сучасних сонячних панелей із підвищеними габаритами, номінальними струмами та напругами. Для відпрацювання методики запропоновано використання навчального фотомодуля з 36 кремнієвих сонячних елементів розміром 2,5×3,0 см і паспортними параметрами: $P_{\text{мрр}}=10$ В, $U_{\text{м}}=17,5$ В, $I_{\text{м}}=0,57$ А, $U_{\text{хх}}=21,5$ В, $I_{\text{кз}}=0,65$ А. Темнові ВАХ, на відміну від світлових, визначаються при кімнатній температурі без освітлення фотомодуля (у повній темноті), що забезпечує їх відтворюваність і залежність лише від стабільності прикладеної напруги постійного струму. Для цього використано лабораторний блок живлення НУ-3000 зі стабілізацією напруги та струму в межах 0...30 В і 0...2 А або альтернативно – магазин опорів чи реостат з живленням від акумуляторів. Як джерело напруги застосовано два послідовно з'єднані акумулятори LOGIC-POWER AGM–MG 12–20 із номінальною напругою 12 В, ємністю 20 А·год та внутрішнім опором $r = 8$ мΩ, для яких розрахункові розрядні струми становлять $I_{20} = 1,0$ А та $I_{10} = 2,0$ А.

Для проектування конструкції та проведення статичного міцнісного аналізу використовувалося програмне забезпечення SolidWorks. За результатами виконаного аналізу навантажень встановлено, що розроблена конструкція має достатній запас міцності та здатна надійно витримувати вагу фотоелектричної панелі при зміні кута нахилу в межах від 0° до 70°.

На зображенні представлена опорна конструкція для встановлення сонячної панелі з можливістю регулювання кута нахилу. Конструкція складається з вертикальної металевої опорної стійки, яка виконує функцію несучого елемента та сприймає основні механічні й вітрові навантаження, а також похилої рами для кріплення фотоелектричного модуля, що виконана з

паралельних профільних напрямних. Для забезпечення зміни кута нахилу панелі конструкція оснащена підкосами та шарнірними з'єднаннями, які дозволяють адаптувати положення сонячної панелі залежно від умов експлуатації та інтенсивності сонячного випромінювання.

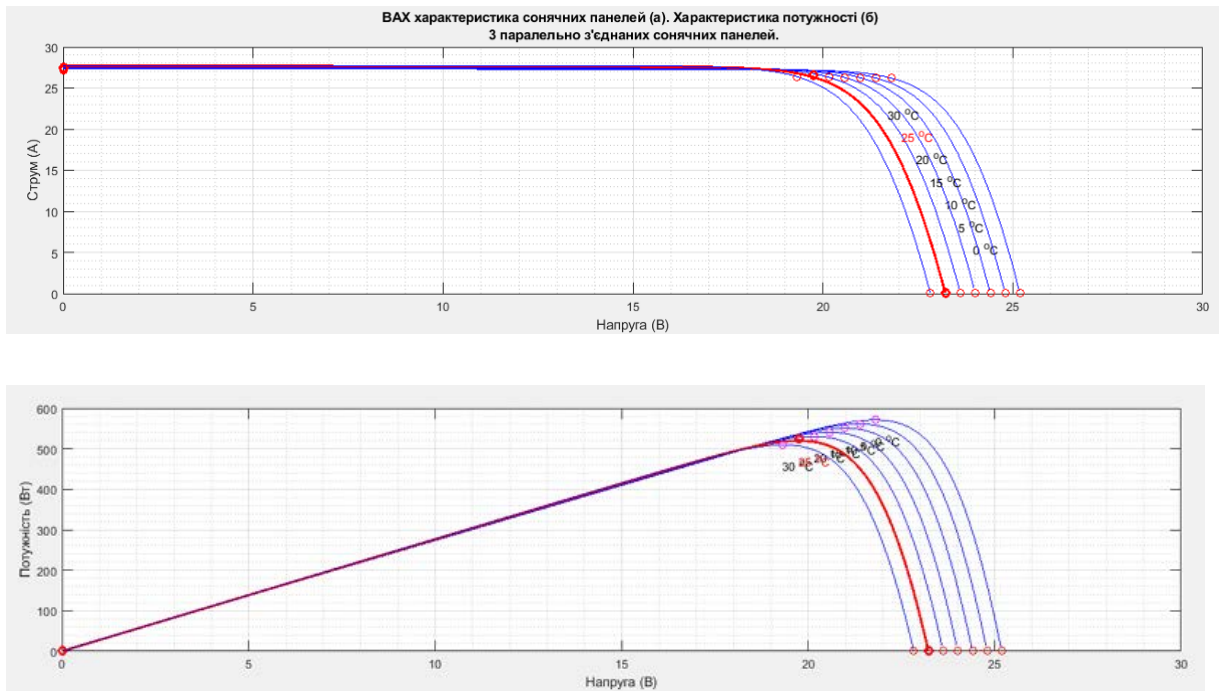


Рис. 8. Вольт-амперна характеристика кремнієвого сонячного елемента фотоелектричної установки за освітленості 1000 Вт/м^2 (1), графік потужності (2); P_{mpp} – точка максимальної потужності ВАХ

З метою підвищення жорсткості та механічної стійкості використано додаткові діагональні балки, кронштейни та підсилюючі елементи, що зменшують деформації конструкції під дією навантажень. У місцях з'єднання передбачені фіксуючі вузли та обмежувачі, які забезпечують надійну фіксацію рами й запобігають її надмірному зміщенню.

Конструкція характеризується компактністю, відносно невеликою масою, можливістю регулювання кута нахилу та надійним кріпленням сонячної панелі у двох площинах, що робить її придатною для використання як у автономних, так і в мережових фотоелектричних системах, а також у складі експериментальних або малопотужних сонячних електростанцій (рис. 9).

На фотографії зображено наземну фотоелектричну установку (рис. 10), що складається з шести сонячних панелей (1), змонтованих на металевій опорній конструкції (2). Панелі об'єднані у єдину систему та розташовані під оптимальним кутом нахилу для ефективного сприйняття сонячного випромінювання. Конструкція встановлена на вертикальній металевій опорі (3), закріпленій на бетонній основі (4), що забезпечує її стійкість та надійність під час експлуатації. Фотоелектричні модулі мають прямокутну форму та з'єднані між собою алюмінієвими рамами (5).



Рис. 9. Конструкція опорної системи для встановлення сонячної панелі з можливістю регулювання кута нахилу.



Рис. 10. Загальний вигляд наземної фотоелектричної установки на металевій опорній конструкції.

Розташування панелей у відкритій місцевості дозволяє мінімізувати затінення та підвищити ефективність генерації електроенергії. На задньому плані видно природне оточення з деревами та будівлею, а на поверхні землі присутній сніговий покрив, що свідчить про експлуатацію системи у зимовий період. Представлена конструкція може використовуватися як автономна або мережева сонячна електростанція для забезпечення електричною енергією житлових чи господарських об'єктів.

Відповідно до поставленого завдання необхідно модернізувати існуючий лабораторний стенд для проведення вимірювань темнових вольт-амперних характеристик сучасних сонячних панелей, які характеризуються більшими геометричними розмірами, а також підвищеними значеннями номінальних струмів і напруг. Для апробації електричної схеми та відпрацювання методики проведення темнових вимірювань запропоновано використати навчальний фотоелектричний модуль, що складається з 136 кремнієвих сонячних елементів розміром 2,5×3,0 см, основні технічні характеристики якого наведені у паспортних даних.

Темнові вольт-амперні характеристики, на відміну від світлових, вимірюються за відсутності освітлення фотомодуля та при кімнатній температурі, тобто в умовах повної темряви. Дотримання таких умов забезпечує стабільність і відтворюваність результатів вимірювань, які в цьому випадку залежать виключно від стабільності прикладеної до фотомодуля напруги постійного струму. Для реалізації таких вимірювань доцільно використовувати лабораторний блок живлення постійного струму НУ-3000, який забезпечує стабілізацію регульованої напруги та струму в діапазонах 0–30 В і 0–2 А відповідно.

Табл. 1

Основне обладнання автономної фотоелектричної системи

№	Обладнання	Основні параметри	Кількість
1	Сонячна панель (Фотомодуль)	Фотоелектричний модуль виготовлений на основі полікристалічних кремнієвих елементів розміром 156×156 мм. Конструкція панелі містить 36 фотоелементів. Габаритні розміри модуля становлять 1480×680×30 мм, а його маса дорівнює 11,6 кг. Номінальна вихідна потужність панелі складає 170 Вт при номінальній напрузі 12 В. Напруга в точці максимальної потужності досягає 19,75 В, а струм короткого замикання становить 9,15 А. Коефіцієнт корисної дії фотоелектричного модуля дорівнює 13,8 %.	6

2	Контролер заряду (КЗ)	Контролер розрахований на роботу в системах із номінальною напругою 12 або 24 В. При цьому значення вхідного струму та струму навантаження не повинні перевищувати 50 А.	1
3	Акумуляторна батарея (АБ)	Акумуляторна батарея має номінальну напругу 12 В та ємність 100 А·год. Її габаритні розміри становлять 305×168×215 мм, що забезпечує зручність розміщення та експлуатації в складі автономних енергетичних систем.	2
4	Інвертор	Інвертор призначений для роботи від мережі змінного струму з вхідною напругою 230 В АС. Пристрій забезпечує стабілізацію вихідної напруги на рівні 230 В АС з допустимим відхиленням $\pm 5\%$. У режимі інвертування формується вихідна напруга 220 В, а робоча частота становить 50 Гц.	1
5	Плата BTM32F4	Мікроконтролер побудований на базі високопродуктивного ядра Cortex-M7 з тактовою частотою 216 МГц. Для зберігання програмного коду передбачено 1 МБ вбудованої FLASH-пам'яті, а обсяг оперативної пам'яті SRAM становить 320 КБ. Крім того, система оснащена зовнішньою пам'яттю обсягом 128 Мбіт Quad-SPI Flash та 128 Мбіт SDRAM, що забезпечує розширені можливості для зберігання даних і виконання складних алгоритмів керування та обробки інформації.	2
6	Електролічильник	Вимірювальний прилад має клас точності 1,0, що забезпечує достатньо високу достовірність отриманих результатів. Для обміну даними та зчитування показників використовується інтерфейс IrDA. Пристрій дозволяє виконувати вимірювання основних електричних параметрів, зокрема потужності, сили струму, напруги та частоти електричної мережі.	3
7	Асинхронний двигун	Електродвигун призначений для роботи від однофазної мережі змінного струму з напругою 220 В. Номінальна частота обертання вала становить 3000 об/хв, а потужність двигуна дорівнює 0,25 кВт. Висота осі обертання складає 71 мм, що є важливим конструктивним параметром під час монтажу та приєднання двигуна до робочого механізму.	4

Як альтернативний варіант може бути застосовано магазин опорів або повзунковий реостат, підключений до акумуляторної батареї, номінальна напруга якої повинна перевищувати напругу холостого ходу фотомодуля на декілька вольт. У даному проєкті пропонується використовувати два послідовно з'єднані акумулятори LOGIC-POWER AGM-MG 12-20, номінальна напруга та ємність яких становлять відповідно 12 В і 20 А·год. Внутрішній опір акумулятора дорівнює 8 мОм, що забезпечує можливість формування стабільного джерела живлення для проведення експериментальних досліджень темнових вольт-амперних характеристик фотоелектричного модуля.

$$I_{20} = C_n/20 = 1,0 \text{ А}; I_{10} = C_n/10 = 2,0 \text{ А}$$

Для експериментального визначення світлових параметрів фотомодуля запропоновано стабілізувати світловий потік лампи розжарювання шляхом її живлення через стабілізатор мережевої напруги або від акумуляторної батареї великої ємності з подальшим інвертуванням. В умовах лабораторії, де практично відсутні повітряні потоки, фотомодуль під дією опромінення швидко нагрівається, що призводить до зміщення напруги холостого ходу, точки максимальної потужності та світлової гілки вольт-амперної характеристики. Для контролю температури фотомодуля та дослідження теплових процесів на стенді пропонується використовувати восьмиканальний регулятор-вимірювач РТ-0802 у комплекті з термопарами. Вимірювання параметрів світлових ВАХ на лабораторному стенді здійснюється універсальними тестерами з ручним перемиканням діапазонів напруги та струму.



Рис. 11. Батарея з двох акумуляторів для прикладання зовнішньої напруги до фотомодуля

Оскільки темнові струми фотомодуля можуть змінюватися від кількох мікроампер до 1 А при напругах від 1 мВ до 30 В, для проведення точних вимірювань у мікроамперному та міліамперному діапазонах запропоновано використовувати цифровий вимірювальний прилад UNI-T UTM1804.



Рис. 12. Тридіапазонний вимірювач темного струму фотомодуля

Напрямок сонячної енергетики лабораторії відновлюваної енергетики оснащений двома приладами для вимірювання прямого (G_b), дифузного (G_d) та глобального (G_{dh}) потоків сонячної радіації, при цьому на навчальному стенді пряме випромінювання моделюється лампою розжарювання зі спектром, близьким до сонячного, а для його вимірювання використовується метеорологічний піранометр ПЗ×3 з чутливою поверхнею 3×3 см та чорно-білою шаховою структурою.

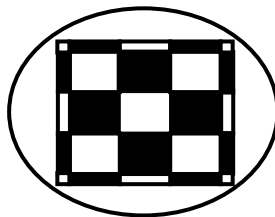


Рис. 13. Геометрія чутливої поверхні піранометра.

Чорні елементи повністю поглинають сонячну енергію та нагріваються інтенсивніше за білі, які її відбивають, а різницю температур між ними реєструють диференційні термопари, об'єднані в термобатарею з кількох десятків елементів, при цьому її вихідна напруга пропорційна різниці температур ΔT гарячих і холодних спайів та, за умови термодинамічної рівноваги, дозволяє визначити інтенсивність прямого потоку сонячної радіації G_b за відповідною формулою:

$$U \cdot \Delta T = kU \quad \text{звідки} \quad G_b = kU \quad (8)$$

Коефіцієнт пропорційності k називають чутливістю приладу та зазначають у його паспорті, при цьому для захисту від запилення і механічних пошкоджень чутливу поверхню піранометра прикривають прозорим напівсферичним ковпачком (див. рис. 14).

За потреби вимірювальну головку піранометра можна встановлювати окремо для безперервного моніторингу інтенсивності променистого потоку, зокрема сонячного випромінювання або освітленості поверхні фотомодуля, а вихідний сигнал термобатареї у мВ узгоджується з входом регулятора РТ-0102-8, який забезпечує його візуалізацію, реєстрацію та передавання даних на ПК для подальшої обробки.

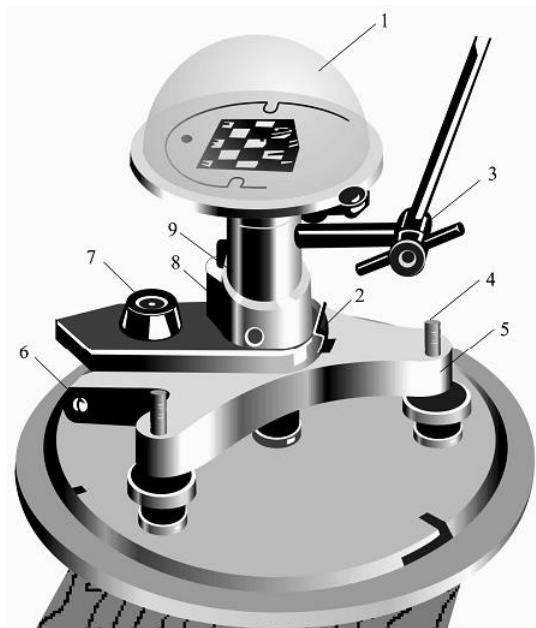


Рис. 14. Загальний вигляд піранометра для контролю енергії світлового потоку

Восьмиканальний регулятор-вимірювач РТ-0102 (див. рис. 15) призначений вимірювання, архівування, індикації зміни вимірюваних величини для автоматичного реагування або керування відповідними технологічними процесами.



Рис. 15. Зовнішній вигляд регулятора-вимірювача РТ-0102 [12]

Прилад РТ-0102 забезпечує зв'язок із персональним комп'ютером через інтерфейси RS232 або RS485 та виконує регулювання за двопозиційним і ПІД-законами керування, причому ПІД-регулювання реалізується імпульсним сигналом із широтно-імпульсною модуляцією, а керування та сигналізація здійснюються по восьми незалежних каналах з індивідуальними уставками рівня.

Вихідні каскади пристрою можуть бути реалізовані через реле 220 В, оптосимістор або транзисторний ключ з різними параметрами комутації, а сам РТ-0102 працює з термоперетворювачами опору, термопарами, піранометрами та уніфікованими аналоговими сигналами, при цьому його передня панель містить індикатори, світлодіоди стану, а також кнопки для налаштування режимів роботи.

Темнові ВАХ будують за результатами вимірювання струму зовнішнього джерела через неосвітлений фотомодуль за умови відсутності фотоструму, при цьому темновими називають

© С.В. Коробка, М.М. Толстушко, І.Г. Стукалець, І.О. Дудко, Н.О. Толстушко

струми, що виникають при прикладенні напруги до його клем, яка може бути прямою або оберненою залежно від полярності, що визначає напрямок струму відносно фотоструму.

Оскільки темнові струми охоплюють широкий діапазон значень, у вимірювальну схему введено перемикач діапазонів і багатофункціональний цифровий прилад із частковим перекриттям шкал, а для забезпечення стабільності використовують акумуляторне живлення з плавним регулюванням напруги через реостати стенда.

Лабораторний стенд виконано у вигляді діючого макета з реальними вимірювальними засобами, що відповідає вимогам дослідження фотомодулів різної потужності, при цьому для безпеки передбачено обов'язкове заземлення металевого каркаса та елементів вимірювальної системи для зменшення шумів і електромагнітних завад.

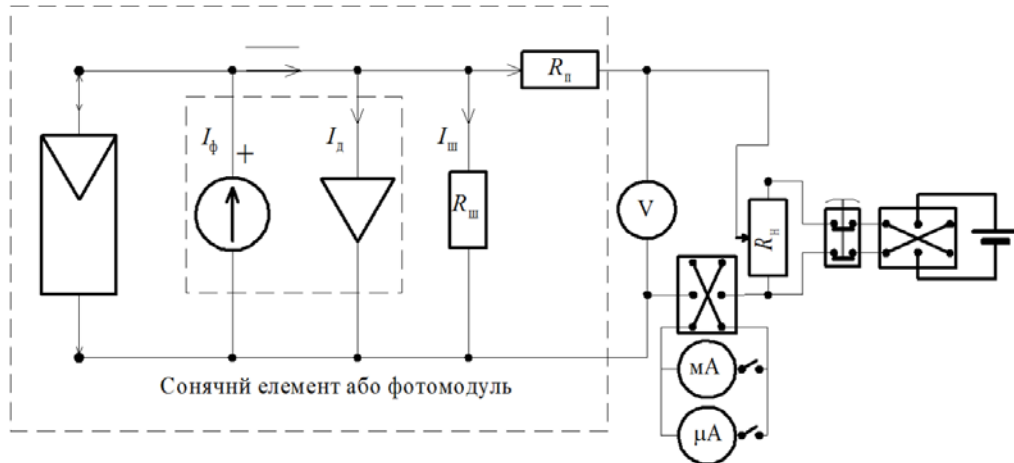


Рис. 16. Схема для вимірювання темнових ВАХ з вузлом живлення та перемикачем його полярності.

За надійного затемнення фотомодуля стабільність його темнових характеристик визначається переважно температурою та прикладеною напругою, при цьому вимірювання в області малих струмів потребують додаткового часу для стабілізації показів цифрових приладів, тоді як у зоні великих струмів тривалість експерименту зменшується, тому вимірювання доцільно починати з малих струмів і обмежувати їх тривалість для уникнення перегріву та спотворення ВАХ.

У процесі експерименту всі операції зводяться до ручної зміни напруги реостатами з кроком 0,5 В із одночасною реєстрацією показів вольметра та амперметра, з обов'язковим перемиканням діапазону вимірювання з мікроамперного на міліамперний у середині процесу, а отримані результати представлені в таблиці 2 та графічно відображені на рис. 17–19.

Темнова ВАХ фотомодуля при прямій полярності прикладеної напруги та зворотному напрямі струму відповідає моделі ідеального планарного фотодіода, однак її подання в лінійному масштабі є малоприматним через різницю між мінімальними та максимальними значеннями струму на кілька порядків.

Параметри елементів заступної схеми фотомодуля, зокрема шунтовий і послідовний опори, визначають за крайніми ділянками нахилу ВАХ, а її якість оцінюють за середньою частиною, при цьому для наочності ці інтервали доцільно аналізувати за графіками в напівлогарифмічній системі координат, як показано на рис. 17.

Табл. 2

Результати вимірювання прикладених напруг і темнових струмів

$U_{пр}, В$	$I_{зв} мкА$	$\ln I_{зв}$	$U_{пр}, В$	$I_{пр} мкА$
Напруга прямої полярності Напрямок струму – зворотний			Напруга протилеж. полярності Напрямок 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		
20,5	176	5,170484		
21	245	5,501258		
21,5	328	5,793014	$R_{\text{п}}=1,75 \text{ Ом}$	
22	420	6,040255		

Лінійні крайні ділянки ВАХ визначають межі інформативних інтервалів показника досконалості та послідовного опору, тоді як для визначення шунтового опору додатково будують темнову ВАХ при прикладенні напруги протилежної полярності до фотомодуля (див. рис. 18), за якою обчислюють шунтовий опір $R_{\text{ш}}$ та нульове значення темнового струму I_0 .

Отже, модернізацію лабораторного стенда для вимірювання темнових ВАХ сучасних фотоелектричних модулів, розрахованих на напруги до 22 В і струми до 1 А та більше, що відповідає параметрам реальних панелей потужністю до 170 Вт. Для експериментів використано навчальний модуль із 36 кремнієвих елементів розміром 2,5×3,0 см, а також акумуляторну батарею 12–24 В ємністю 20 А·год із внутрішнім опором близько 8 мОм, що забезпечує стабільне джерело живлення.

Вимірювання темнових струмів проводились у діапазоні від 0,005 мкА до 420 мА при зміні напруги від 0,5 до 22 В, з кроком 0,5 В, що дозволило отримати повну нелінійну ВАХ фотомодуля. Для точного вимірювання застосовано багатодіапазонний цифровий прилад із перекриттям шкал та перемиканням діапазонів між мікроамперним і міліамперним режимами.

За результатами обробки експериментальних даних побудовано темнові ВАХ у лінійному та напівлогарифмічному масштабах, що охоплюють зміну струму на 5–6 порядків. Встановлено, що в області малих струмів ($<10^{-3}$ – 10^{-2} А) спостерігається експоненціальна залежність тоді як у великих струмах ($>0,1$ А) проявляється вплив послідовного опору.

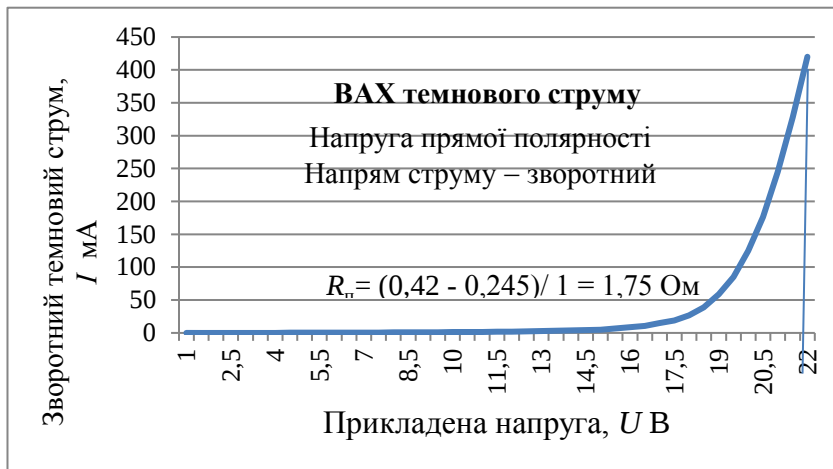


Рис. 17. Темнова ВАХ фотомодуля за результатами вимірювання зворотного струму від прикладеної напруги прямої полярності

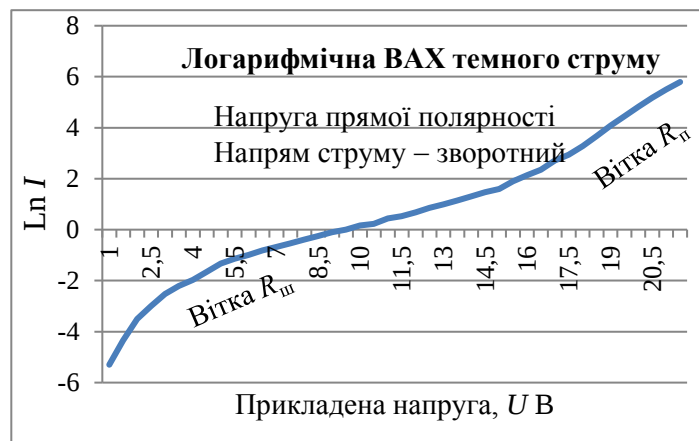


Рис. 18. Темнова ВАХ фотомодуля від прикладеної напруги прямої полярності

З аналізу крайніх ділянок ВАХ визначено послідовний опір фотомодуля, який становить близько 1,75 Ом, що узгоджується з експериментальними даними. Додатково побудована характеристика при зворотній полярності дозволила оцінити шунтовий опір $R_{ш}$, значення якого є суттєвим для оцінки якості фотомодуля.

Результати підтвердили, що модернізований стенд забезпечує коректне відтворення темнових характеристик у широкому діапазоні напруг і струмів, а також придатний для аналізу параметрів реальних сонячних панелей. Отримані дані можуть бути використані для оцінки електричної досконалості фотомодулів і їх заступної схеми.

Висновки. У роботі виконано комплексне обґрунтування та модернізацію лабораторного стенда для дослідження темнових вольт-амперних характеристик сучасних фотоелектричних модулів з підвищеними електричними параметрами та збільшеними геометричними розмірами. Запропоновано схему вимірювального комплексу, що забезпечує формування регульованої напруги, перемикання полярності та точне вимірювання струмів у широкому діапазоні значень.

Розглянуто методику проведення темнових вимірювань, яка передбачає роботу фотомодуля в умовах повного затемнення, стабілізацію температурного режиму, поетапну зміну прикладеної напруги та використання багатодіапазонних вимірювальних приладів для реєстрації малих і великих струмів. Показано, що коректність отриманих характеристик суттєво залежить від стабільності джерела живлення, якості контактів та мінімізації електромагнітних завад.

На основі експериментальних даних побудовано темнові ВАХ для різних режимів полярності прикладеної напруги, що дозволило ідентифікувати особливості поведінки фотомодуля, зокрема нелінійність струмових залежностей у широкому діапазоні напруг. У напівлогарифмічному

представленні визначено інформативні ділянки характеристик, за якими оцінено параметри заступної схеми, включаючи послідовний та шунтовий опори.

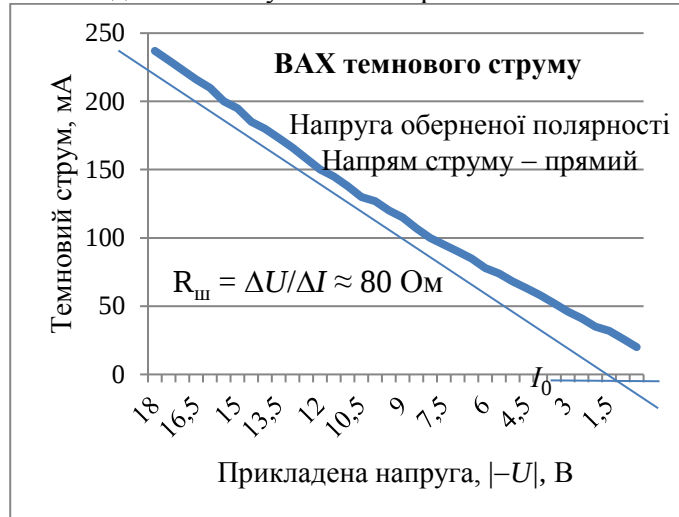


Рис. 19. Темнова ВАХ фотомодуля від прикладеної напруги протилежної полярності

Додатково встановлено, що побудова ВАХ при протилежній полярності дозволяє визначити шунтовий опір $R_{ш}$ та оцінити нульовий темновий струм I_0 , що є важливим для аналізу якості фотомодуля та його електричної досконалості. Отримані результати підтверджують придатність модернізованого стенда для дослідження сучасних фотоелектричних систем у навчальних і наукових цілях.

Список використаних джерел.

1. Anani N., Ibrahim H. Adjusting the Single-Diode Model Parameters of a Photovoltaic Module with Irradiance and Temperature // *Energies*. 2020. Vol. 13, No. 12. P. 3226. DOI: 10.3390/en13123226.
2. Hishikawa Y., Yamagoe K., Asaoka K. et al. Improved precision of the outdoor performance measurements of photovoltaic modules by using the photovoltaic irradiance sensor // *Solar Energy*. 2020. Vol. 211. P. 82–89. DOI: 10.1016/j.solener.2020.09.002.
3. Bensalem S., Chegaar M., Nehari D. Description of short circuit current of outdoor photovoltaic modules by multiple regression analysis under various solar irradiance levels // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 147. P. 895–902. DOI: 10.1016/j.renene.2019.09.083.
4. Laudani A., Fulginei F. R., Salvini A. An accurate one-diode model suited to represent the current-voltage characteristics of crystalline and thin-film photovoltaic modules // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 145. P. 725–743. DOI: 10.1016/j.renene.2019.06.074.
5. Leitão D., Torres J. P. N., Fernandes J. F. P. Spectral Irradiance Influence on Solar Cells Efficiency // *Energies*. 2020. Vol. 13, No. 19. P. 5017. DOI: 10.3390/en13195017.
6. Appelbaum J., Maor T. Dependence of PV Module Temperature on Incident Time-Dependent Solar Spectrum // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, No. 3. P. 914. DOI: 10.3390/app10030914.
7. Bonilla Castro J., Schweiger M., Moser D. et al. *Climatic Rating of Photovoltaic Modules: Different Technologies for Various Operating Conditions*. IEA PVPS Task 13 Report IEA-PVPS T13-20:2020. 166 p. ISBN 978-3-907281-08-6.

Дата надходження статті до видання: 21.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.05.2026

Дата оприлюднення 28.05.2026