

АВТОНОМНА СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ НА ОСНОВІ МІКРОКОМП'ЮТЕРА ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

Отримано 17 серп. 2022; рекомендовано до публікації 27 вер. 2022
Доступно онлайн 30 вер. 2022

О. Ю. Гаєвський¹, В. Ю. Іванчук²

Автор для кореспонденції: Олександр Гаєвський,
e-mail: a.gaevskii@kpi.ua

У цій роботі розроблено конструкцію та програмні алгоритми автономної системи для тестування фотоелектричних модулів (ФМ) у реальних умовах експлуатації. Розвинутий метод обробки вольт-амперних характеристик (ВАХ) модулів дозволяє визначати параметри фотомодулів: фотострум, зворотний струм насичення рп-переходу, коефіцієнт неідеальності, послідовний та паралельний опори електричних втрат. Слід відзначити, що ці параметри зазвичай не надаються виробниками модулів, але вони суттєві для визначення поточного стану ФМ, їх діагностики, а також для коректного прогнозування роботи фотоелектричних станцій (ФЕС) у різних зовнішніх умовах. Автоматизована вимірювальна система сконструйована на базі мікрокомп'ютера Raspberry Pi B, у ній реалізований метод сканування ВАХ шляхом зміни резистивного навантаження. Комутація резисторів здійснюється MOSFET-транзисторами, якими керує певна програма, записана в пам'ять мікрокомп'ютера. Тривалість сканування всіх ВАХ не перевищує кількох секунд, що дає можливість отримувати реальну ВАХ при змінних сонячній радіації і температурі, та проводити тестування ФМ в польових умовах на ФЕС. Параметри ФМ у рамках однодіодної схеми заміщення розраховуються за допомогою оригінального методу рішення системи нелінійних рівнянь за стійким ітераційним алгоритмом, який заснований на розкладанні нелінійних рівнянь за малими параметрами та забезпечує визначення параметрів не більш ніж за десять секунд.

Ключові слова: фотоелектричний модуль, вольт-амперна характеристика, часткове затінення, схема заміщення фотомодуля, визначення параметрів фотомодуля.

¹ д-р фіз.-мат. наук, професор.
<https://orcid.org/0000-0001-6144-2441>

² аспірант.
<https://orcid.org/0000-0002-0585-9610>

^{1,2} НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна;
Інститут відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ, Україна.

AUTONOMOUS MEASUREMENT SYSTEM BASED ON MICROCOMPUTER FOR TESTING PHOTOELECTRIC MODULES

Received 17 Aug. 2022; accepted 27 Sept. 2022.
Available online 30 Sept. 2022

A. Gaevskii¹, V. Ivanchuk²

Author for correspondence: Oleksandr Gaevskii,
e-mail: a.gaevskii@kpi.ua

In this work the design and software for an autonomous measuring system on the microcomputer Raspberry Pi which destined for testing photovoltaic modules (PVM) in real conditions of exploitation are developed. The developed method for processing of the module's current-voltage characteristics (CVC) allow to determine the parameters of PVM: photocurrent, reverse saturation current of the pn-junction, non-ideality coefficient, series and parallel resistances of electrical losses. It have be noted that the mentioned parameters, as a rule, are not provided by module manufacturers, but they are essential for

¹ Doctor of Phys. Math. Sci., Professor
<https://orcid.org/0000-0001-6144-2441>

² PhD student.
<https://orcid.org/0000-0002-0585-9610>

^{1,2} NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine; Institute of renewable energy, NAS Ukraine, Kyiv, Ukraine.

determining the current state of PVM, for their diagnostics, as well as for correctly forecasting the operation of PV plants in various external conditions. The measuring system implements the method of CVC scanning by changing the resistive load. Switching of resistors is carried out by field transistors (MOSFET), which are controlled by a certain program wrote in the microcomputer memory. The duration of scanning the entire CVC does not exceed a few seconds, which makes it possible to obtain real CVC under changable solar radiation and temperature, and perform PVM testing under exploitation at PV plant. PVM parameters within the framework of the single-diode model are calculated using the proposed method of solving the nonlinear equations system by the stable iterative algorithm, which is based on expansion of equations by small parameters and ensures the determining of parameters for about ten seconds.

Keywords: PV module, current-voltage characteristic, partial shading, equivalent scheme of PV module, determination of PV module parameters.

Перелік використаних позначень та скорочень

АЦП	– аналого-цифровий перетворювач	XX	– холостий хід
ВАХ	– вольт-амперна характеристика	CVC	– current-voltage characteristics (ВАХ)
КЗ	– коротке замикання	MPP	– maximum power point (точка максимальної потужності)
ККД	– коефіцієнт корисної дії	STC	– standard testing conditions (стандартні умови тестування)
ФЕС	– фотоелектрична станція		
ФМ	– фотоелектричний модуль		

Вступ і постановка задачі. Однією з основних проблем під час експлуатації фотоелектричних модулів (ФМ) у складі ФЕС є поступове падіння електричних характеристик ФМ внаслідок певних природних процесів та випадкових або навмисних пошкоджень. Все це обумовлює необхідність проведення масового тестування фотомодулів, з'ясування їх реального стану, можливого терміну служби. Фахівці в галузі сонячної енергетики повинні мати мобільні недорогі прилади, вимірювальні системи для оперативного аналізу можливості введення до ладу найближчим часом пошкоджених фотоелектричних модулів.

Ефективність ФМ істотно залежить не тільки від сонячної радіації, затінення об'єктами, а й від процесу старіння під час експлуатації в реальних умовах. Результатом старіння фотоелектричних модулів під дією температурних коливань, високої вологості, інтенсивного опромінення стає погіршення їхніх електричних характеристик і насамперед зниження ККД [1, 2]. Основні параметри ФМ (напруга V_{oc} , струм I_{sc} і точка максимальної потужності V_m , I_m) виробники вимірюють у стандартних тестових умовах (Standard Test Conditions – STC) [3]. Але для опису поточного стану ФМ, особливо після їх довгострокової експлуатації, необхідне знання повнішого набору параметрів, які здебільшого треба отримувати у місці розташування ФЕС.

Отже, система вимірювання параметрів ФМ на місці може надати цінну інформацію для оптимізації виробітку й резервування енергії в енергосистемі. Тому актуальною задачею є розробка відповідної вимірювальної системи, яка має містити в собі як апаратні засоби для оперативного вимірювання в польових умовах, так і алгоритми для інтерпретації результатів вимірювань і отримання параметрів фотоелектричних модулів.

Існують різноманітні методи й апаратне забезпечення, призначені для отримання параметрів ФМ [4–6]. Вони полягають переважно у вимірюванні ВАХ за допомогою керування струмом, який проходить через ФМ. Загальний огляд існуючих методів вимірювання ВАХ ФМ наведено, наприклад, в роботах [7–9], де було проаналізовано такі методи: резистивний, ємнісний, електронного навантаження, біполярного підсилювача, DC-DC перетворювача. Останніми роками розвивається метод змінного навантаження на основі польових транзисторів (MOSFET), якими керує сигнал невеликої амплітуди та які покривають весь діапазон навантаження ФМ [10]. Перелічені методи та системи на їх основі відрізняються точністю, ціною та габаритами обладнання, швидкістю та простотою використання. Однак не всі вони забезпечують реалізацію у вигляді компактного завершеного рішення, що дає змогу працювати без прив'язки до комп'ютера й надавати значення повного набору параметрів модулів. У цій роботі пропонується таке рішення, що засноване на використанні простого методу змінного резистивного навантаження з блоком MOSFET, а також програмного керування та обчислювальних ресурсів мікрокомп'ютера Raspberry Pi [10].

Слід зазначити, що експериментальні результати вимірювання ВАХ потребують подальшої програмної обробки, яка складається зазвичай з апроксимації отриманих даних та моделювання ВАХ за допомогою того чи іншого типу функцій [11, 12]. На основі такої модельної ВАХ здійснюється розрахунок параметрів ФМ у рамках тієї чи іншої схеми заміщення [13–15]. Нами використовується одностійна схема заміщення [4–12], яка, незважаючи на свою простоту, доволі повно характеризує реальний стан модуля.

Системи тестування ФМ розробляються відповідно до вимог, сформульованих в ряді стандартів (наприклад,

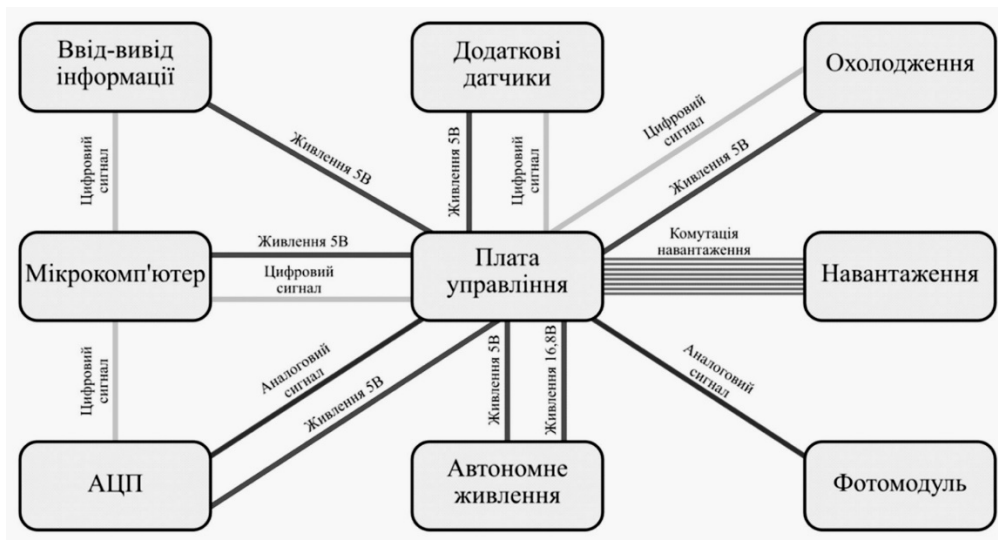


Рис.1. Блок-схема взаємозв'язків основних компонентів вимірювальної системи ФМ на основі мікрокомп'ютера Raspberry Pi.

Fig. 1. Block-diagram of the interconnection of the main components of the PV measurement system based on the Raspberry Pi microcomputer

ЕС 62446:2009, IEC 60364-6, NEN 1010/NTA 8013) [16, 17]. З метою оптимізації процесів установлення і подальшої діагностики модулів багато компаній пропонують обладнання для тестування, яке виконує вимірювання як електричних характеристик й ефективності фотоелектричної системи, так і інтенсивності радіації. За допомогою PV-тестерів можна безпосередньо вимірювати вказані вище параметри, але аналіз отриманих залежностей (наприклад, ВАХ) і визначення ширшого набору параметрів ФМ зазвичай не передбачені. Для виконання цих задач потрібне програмне і математичне забезпечення, яке в комерційних моделях тестерів відсутнє.

Метою цієї роботи є розробка автоматизованої системи вимірювання ВАХ фотоелектричних модулів, які працюють в реальних умовах експлуатації, з можливістю подальшої екстракції актуальних параметрів досліджуваних ФМ. Розроблена в цій роботі система вимірювання ВАХ була застосована для визначення параметрів ФМ, які працюють в умовах повного освітлення та часткового затінення. Показано, що ця система може бути успішно застосована для вимірювання впливу затінення на фізичні параметри ФМ.

Конструкція апаратної частини вимірювальної системи. ВАХ фотомодуля вимірюється резистивним методом шляхом зміни опору навантаження освітленого модуля від режиму короткого замикання (КЗ) до холостого ходу (ХХ). Визначення необхідних параметрів ФМ здійснюється під час подальшої програмної обробки ВАХ.

Блок-схема автоматизованої вимірювальної системи та взаємозв'язки між її компонентами показані на рис. 1. Основним компонентом є мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4 Model B, який призначений для виконання всіх необхідних розрахунків, зберігання інформації, управління іншими частинами приладу. Через систему вводу-виводу інформації, яка оздоблена сенсорним екраном,

задаються необхідні параметри вимірювання, зчитуються результати експерименту та розрахунків. Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) Raspberry Pi High-Precision AD/DA перетворює сигнали від аналогових датчиків у цифрову форму та передає до мікрокомп'ютера. Цей АЦП дає змогу підключити вісім вхідних аналогових сигналів, оцифровуючи їх з 24-розрядною точністю і частотою оцифрування до 30 кГц. Для вимірювання струму через навантаження використано датчик на ефекті Холла компанії Allegro.

Електрична схема блоків вимірювальної системи показана на рис. 2. Реалізація технології сканування ВАХ за допомогою змінного резистивного навантаження потребує пояснень. Насамперед конструкція навантажувальної частини має відповідати значенням потужності ФМ і струму через навантаження. Цей найгабаритніший компонент системи має тенденцію швидко нагріватись під час сканування в області короткого замикання, тому слід здійснювати вимірювання за дуже короткі проміжки часу та контролювати температуру всередині корпусу приладу. В зв'язку з цим попередньо було проведено розрахунки теплового балансу всієї конструкції системи. Для переважно рівномірного розподілу точок на ВАХ під час сканування попередньо також розраховувалися оптимальні значення номіналів резисторів у наборі опорів. Резистори були з'єднані паралельно, що дозволяє завдяки використанню резисторів більшого номіналу зменшити струм через кожний резистор.

Для визначення оптимального набору опорів слугує розроблена програма, що моделює роботу вимірювальної системи при різних конфігураціях резистивного навантаження і різних моделях ФМ. Моделювання при різних кількостях резисторів у наборі показало, що точність вимірів помітно погіршується при кількості < 7 та при зменшенні кількості експериментальних відліків < 15 . Найповніше охоплює криву типових ВАХ магазин резисторів, що починається з опору 1 Ом. Збільшення кількості

резисторів не дає суттєвого покращення, але збільшує час сканування. При визначенні необхідної потужності резисторів треба враховувати, що кожен з них може використовуватись у декількох комбінаціях під час вимі-

стабільність роботи, а для захисту використовуються різноманітні електронні компоненти, як-от полімерні запобіжники, конденсатори для стабілізації коливань напруги й варистор для запобігання перенапрузі.

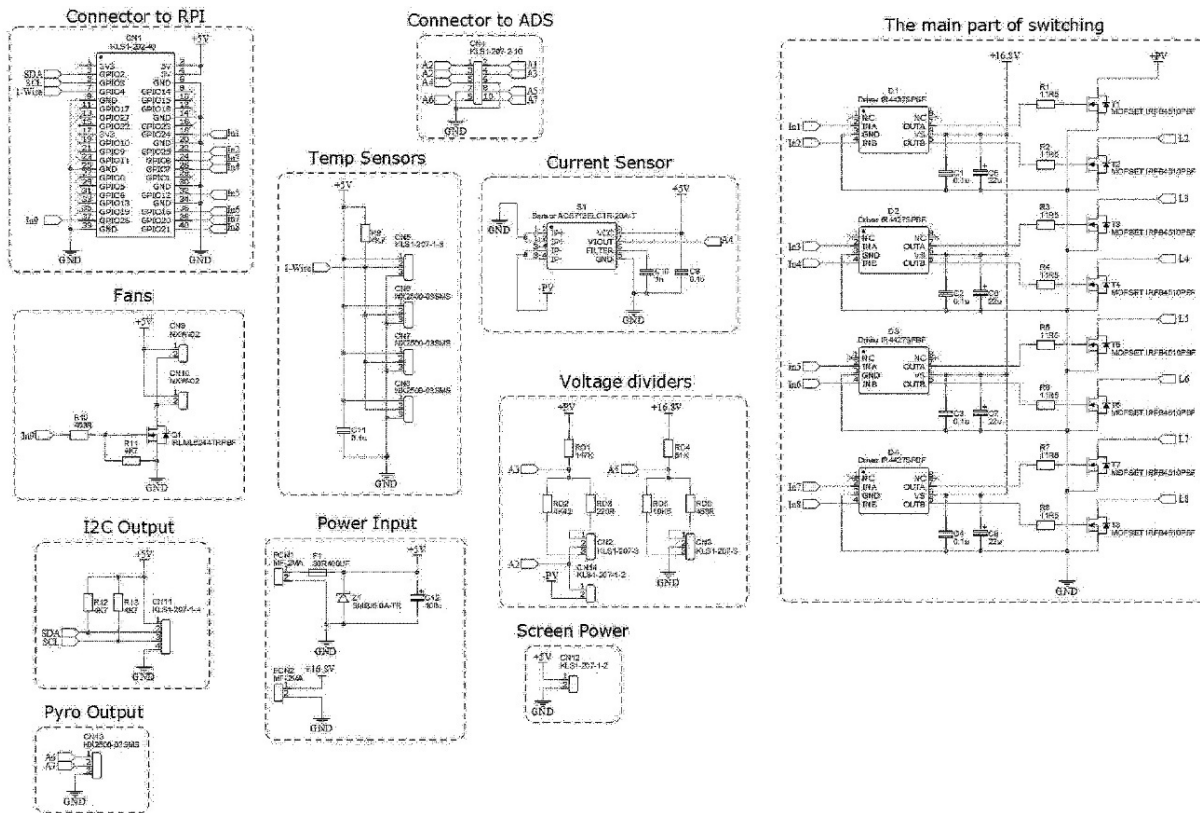


Рис.2. Електрична схема плати управління

Fig. 2. Electrical layout of the control board

рювання при різних струмах. Діапазон значень струму залежить також від потужності ФМ, що тестується. Всі ці проблеми стають менш істотними при зменшенні тривалості роботи резисторів під навантаженням. Наприклад, згідно з даними компанії – виробника резисторів Hitano, якщо через резистор протікає струм не довше 5 с, його можна тримати під навантаженням до $6,25 \cdot P_{ном}$. З урахуванням перелічених факторів магазин опорів складався з семи резисторів опором від 1 до 64 Ом та потужністю від 23 до 278 Вт. Для порівняння масо-габаритних показників та ступеня перегріву було виготовлено два магазини резисторів, розрахованих на 5 с перенавантаження (цементні дровові резистори) та на 1 с (метало-оксидні резистори).

Слід зауважити, що розроблена вимірювальна система може працювати як за технологією змінного опору навантаження, так і за циклом заряджання ємності.

Плата управління, яка розроблена в цій роботі (її зовнішній вигляд показано на рис. 3), виконує програмний сценарій, записаний у пам'ять мікрокомп'ютера, керує MOSFET-транзисторами для комутації резистивного навантаження, забезпечує передачу даних з датчиків, реалізує зв'язок між усіма компонентами системи. Друкована плата забезпечує надійне з'єднання компонентів і

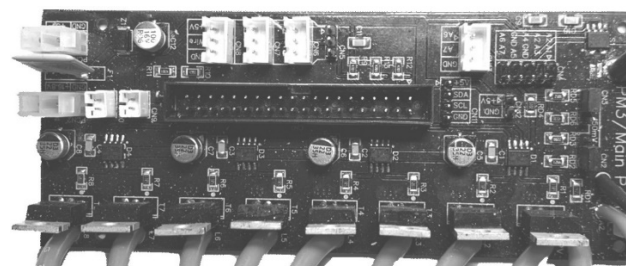


Рис. 3. Плата управління вимірювальною системою

Fig. 3. Control board of the measuring system

Автономне живлення дає змогу використовувати вимірювальну систему в польових умовах, отримувати доступ до результатів тестувань без підключення до зовнішнього джерела, а також забезпечує мобільність та можливість віддаленого керування. Ємність батареї в складі приладу складає 45 Вт·год (чотири літій-іонних акумулятори) – цього достатньо для безперервної роботи впродовж 8 год в активному режимі.

Додаткові датчики забезпечують контроль температури компонентів приладу, виконують виміри температури ФМ та освітленості під час експерименту. Блок охолодження забезпечує нормальний режим роботи,

запобігає перегріву всіх компонентів. Для зручності роботи з приладом і належного захисту компонентів системи було розроблено та виготовлено корпус за технологією друку FDM.

Програмне забезпечення. Для управління усіма апаратними компонентами, виконання обробки отриманої інформації, проведення необхідних розрахунків, виводу результатів розроблено відповідне програмне забезпечення. Платформа Raspberry Pi підтримує роботу з усіма мовами програмування, що доступні на платформі Linux, але в цій роботі була вибрана мова Python. Програмне забезпечення базується на принципі модульності, що дозволяє розробляти окремі компоненти системи, які можуть функціонувати окремо один від одного. Програмний пакет складається з таких модулів:

- основний системний модуль;
- модуль графічного інтерфейсу;
- модуль основних функцій системи;
- модуль керування даними;
- модуль сервера.

Для зручної та ефективної взаємодії з програмними модулями розроблено користувацький інтерфейс (рис. 4) з доступом через сенсорний екран. Як інструмент розробки вибрана графічна бібліотека Tkinter, призначена для створення програм у Python з віконним інтерфейсом. Для можливості віддаленого керування автономною системою та передачі результатів тестування було реалізовано можливість вебдоступу за допомогою будь якого браузера.

Передані через USB дані піддаються попередній обробці в середовищі MATLAB за допомогою спеціалізованої програми, в ході якої виконується сортування пар значень (V, I) й апроксимація ВАХ на певних відрізках поліномами від 1-го до 4-го ступеня. Від вибору точок зшивання відрізків апроксимант критичним чином залежить якість апроксимації. Тому координати точок зшивання також знаходяться в ході процедури апроксимації, яка будується на алгоритмі нелінійної оптимізації. В результаті отримують гладку неперервно-диференційовану функцію $I(V)$ – саме вона використовується на наступному етапі – визначення параметрів ФМ.

За отриманими результатами апроксимації визначаються струм короткого замикання (short circuit, SC) I_{sc} , напруга холостого ходу (open circuit, OP) V_{oc} , точка максимуму потужності (Maximum Power Point, MPP), яка характеризується парою величин V_m, I_m . Обчислюються також тангенси кутів нахилу апроксимант в області КЗ і ХХ та пов'язані з ними динамічні провідності G_{sc} і G_{oc} відповідно:

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V \rightarrow 0} = G_{sc} \equiv -\frac{1}{R_{sc}}, \quad \left. \frac{dI}{dV} \right|_{V \rightarrow V_{oc}} = G_{oc} \equiv -\frac{1}{R_{oc}}, \quad (1)$$

На основі перелічених величин розраховуються параметри ФМ однодіодної схеми заміщення за методом і алгоритмом згідно з попередньою роботою [13].

Результати вимірювань і розрахунків. У цій роботі визначення поточного стану ФМ проводили в реальних польових умовах з використанням системи тестування для зняття ВАХ та подальшої її обробки за допомогою розроблених програмних засобів. Під час експериментальних досліджень для проведення вимірів використовували

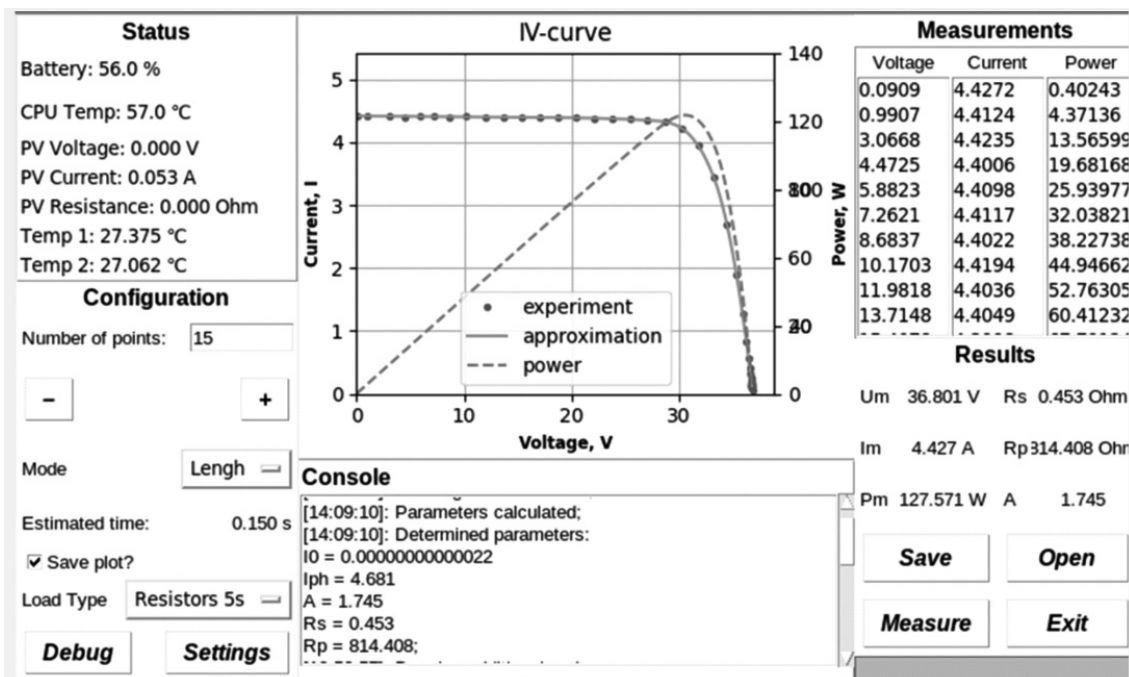
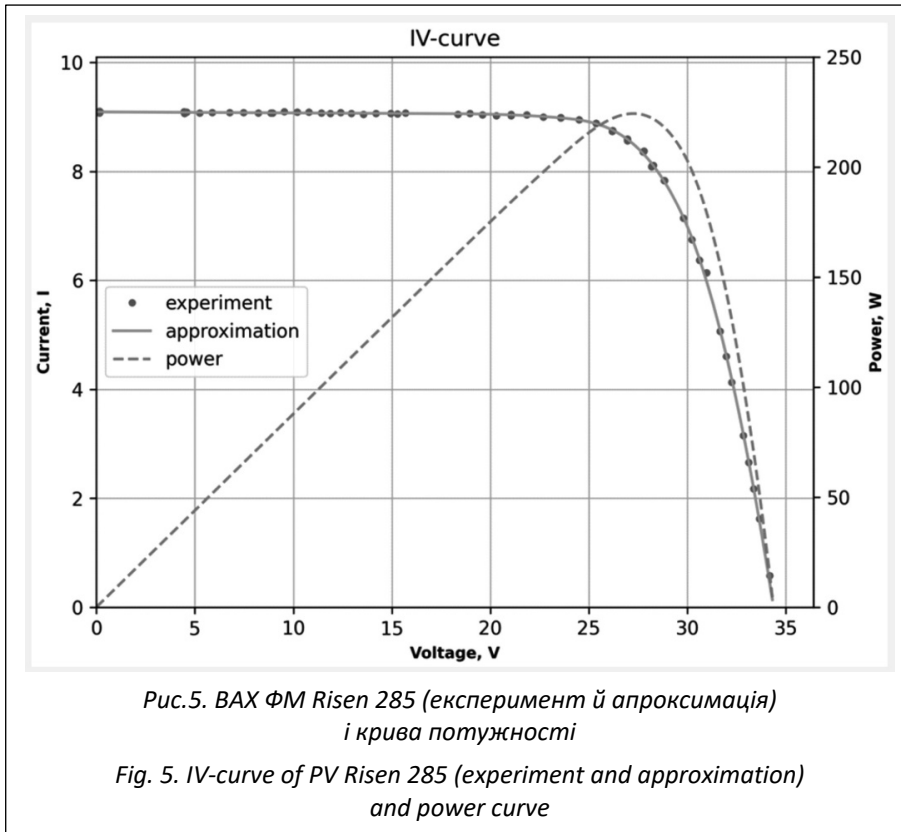


Рис. 4. Користувацький інтерфейс на сенсорному екрані

Fig. 4. User interface on the touch screen

монокристалічний модуль Risen потужністю 285 Вт (встановлений в альбомній орієнтації на південь з кутом на-

система дає змогу швидко і з високим ступенем точності сканувати ВАХ при змінних умовах сонячної радіації та температури.



хилу $\beta = 35^\circ$). Приклад результатів вимірювання та апроксимації зображено на рис. 5. Загалом було знято 64 експериментальних відліки, що зайняло близько 0,78 с, температура резисторів не перевищувала 43°C . Значення параметрів, отриманих на основі даних цього прикладу, наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Результати екстракції параметрів ФМ (резистивне навантаження)

Table 1. Results of extraction of PV parameters (resistive load)

Параметр	Од. вим.	Значення
Напруга ХХ	В	34,41
Струм КЗ	А	9,107
Максимум потужності	Вт	232,89
Послідовний опір	Ом	0,524
Паралельний опір	Ом	565,14
Коефіцієнт неідеальності	—	1,725
Зворотній струм	А	$4,81\text{e-}11$

Висновки. Розроблена на основі мікроконтролерної плати Raspberry Pi система бюджетного рівня дозволяє вимірювати характеристики фотоелектричних модулів у реальних польових умовах. Завдяки принципу управління роботою системи з мікрокомп'ютера Raspberry Pi отримання необхідного набору відліків на ВАХ здійснюється за доволі короткий час. У результаті розроблена

Програмне забезпечення на мові Python з введенням-виведенням інформації через інтерфейс із сенсорним екраном дозволяє зручно керувати процесом вимірювання й обробки даних у режимі реального часу. В розробленому графічному інтерфейсі передбачений перегляд точок вимірювання, апроксимаційної кривої ВАХ, точок струму КЗ, напруги ХХ і максимуму потужності. Розроблений метод і програма в пакеті MATLAB дає змогу в подальших обчисленнях швидко отримувати значення параметрів ФМ в рамках однодіодної моделі.

Резистивний метод сканування ВАХ фотомодулів у вигляді представленого компактного пристрою є простим і надійним під час тестування фотомодулів потужності до 400 Вт. Для покращення точності розрахунку параметрів можливе сканування певних ділянок ВАХ, що передбачено в інтерфейсі пристрою. З метою подальшого покращення результатів вимірювання необхідно використовувати АЦП з більшою частотою оцифрування, а також збільшувати кількість резисторів у блоці навантаження, що розширить набір можливих комутацій.

Актуальність розробки цієї вимірювальної системи полягає в тому, що вона дає змогу проводити тестування та діагностику поточного стану ФМ, а також визначати фактичні електричні параметри ФМ, які необхідні для задач оптимізації проектних рішень для ФЕС. Окремими задачами, які можна вирішувати за допомогою розробленої системи, є визначення дефектного модуля в масиві, ступеня старіння модулів, прогнозування терміну їх служби. Набір параметрів, який визначається за допомогою розроблених програм та вимірювальної системи, дозволяє коректно визначати електричні характеристики ФМ, які не надаються виробниками, а також отримувати залежності цих характеристик від зовнішніх факторів: рівня сонячної радіації, температури, часткового затінення тощо.

ПОСИЛАННЯ

1. Manganiello P., Balat M., and Vitelli M. A survey on mismatching and aging of PV modules: The closed loop. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2015. Vol. 62. No. 11. Pp. 7276–7286.

2. *Kim J., Rabelo M., Parvathi Padi S. et al.* Review of the Degradation of Photovoltaic Modules for Life Expectancy. *Energies* 2021. 14. 4278. <https://doi.org/10.3390/en14144278>
3. *Er Z., Roubah Z., Kizilkan G., and Orken A. T.* Standards and Testing Experiments for a Photovoltaic Module. *European Journal of Science and Technology. Special Issue*, Jan. 2018. Pp. 12–15.
4. *Zhu Y., Xiao W.* A comprehensive review of topologies for photovoltaic I–V curve tracer. *Solar Energy*, 2020. Vol. 196. Pp. 346–357.
5. *Гаєвський О. Ю., Іванчук В. Ю., Корнієнко І. О.* Система вимірювання параметрів фотоелектричних модулів в реальних умовах експлуатації/ Відновлювана енергетика, 2019. № 2 (57). С. 32–39.
6. *Гаєвський О. Ю., Іванчук В. Ю., Корнієнко І. О., Бодняк В. В.* Алгоритм і програмне забезпечення для Arduino-системи тестування фотоелектричних модулів. *Відновлювана енергетика*. 2021. No 1 С. 42–49.
7. *Amiry H., Benhmida M., Bendaoud R., et al.* Design and implementation of a photovoltaic I-V curve tracer: Solar modules characterization under real operating conditions. *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 169. Pp. 206–216.
8. *Cotfas D. T., Cotfas P. A., Ursutiu D., and Samoila C.* Current-voltage characteristic raising techniques for solar cells. Comparisons and applications. 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. 2010. Pp. 1115–1120.
9. *Duran E., Piliouline M., Sidrach-de-Cardona M., Galan J., Andujar J. M.* Different methods to obtain the I-V curve of PV modules: A review. 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference San Diego, CA, USA. 2008. Pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2008.4922578>.
10. *Sarikh S., Raoufi M., Bennouna A. et al.* Implementation of a plug and play I-V curve tracer dedicated to characterization and diagnosis of PV modules under real operating conditions. *Energy Conversion and Management*, 2020. Vol. 209. 112613, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112613>.
11. *Hansen C. W.* Parameter Estimation for Single Diode Models of Photovoltaic Module. SANDIA Report, SAND2015-2065, March 2015. 67 p. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1177157>.
12. *Гаєвская А. Н.* Алгоритм аппроксимации вольт-амперных характеристик фотомодулей в условиях частичного затенения. *Відновлювана енергетика*. 2019. № 3 (58). С. 21–29. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3\(58\).21-29](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3(58).21-29).
13. *Gaevskii A.* Method for determining parameters of PV modules in field conditions // 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), April 17–19. 2019. Kyiv, Ukraine.
14. *Humada M., Darweesh S. Y., Mohammed K. G. et al.* Modeling of PV system and parameter extraction based on experimental data: Review and investigation. *Solar Energy*. 2020. Vol. 199. Pp. 742–760.
15. *Venkateswari R., Rajasekar N.* Review on parameter estimation techniques of solar photovoltaic systems // *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2021, Vol. 31. No. 11.
16. *IEC 62446*. Edition 1.0 2009-05. International standard. Grid connected photovoltaic systems – Minimum requirements for system documentation, commissioning tests and inspection. <https://solargostaran.com/files/standards/IEC/IEC%2062446-2009.pdf>.
17. *SIST EN 62446:2010*. Grid connected PV systems. Minimum requirements for system documentation commissioning tests, and inspection requirements. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/f0f55437af90-4495-9417-d77d4266844a/sist-en-62446-2010>.

REFERENCES

1. *Manganiello P., Balat M., and Vitelli M.* A survey on mismatching and aging of PV modules: The closed loop. *IEEE Transactions on Industrial Electronic.*, 2015. Vol. 62. No. 11. Pp. 7276–7286.
2. *Kim J., Rabelo M., Parvathi Padi S. et al.* Review of the Degradation of Photovoltaic Modules for Life Expectancy. *Energies* 2021. 14. 4278. <https://doi.org/10.3390/en14144278>.
3. *Er Z., Roubah Z., Kizilkan G., and Orken A.T.* Standards and Testing Experiments for a Photovoltaic Module // *European Journal of Science and Technology. Special Issue*, Jan. 2018, Pp. 12–15.
4. *Zhu Y., Xiao W.* A comprehensive review of topologies for photovoltaic I–V curve tracer // *Solar Energy*, 2020, Vol. 196, p. 346–357.
5. *Gaevskii A. Y., Ivanchuk V. Y., Kornienko I. O.* System of operative measurements of PV module parameters in real conditions of operation. *Renewable energy*. 2019. No. 2 (57), Pp. 32–39.
6. *Gaevskii A. Y., Ivanchuk V. Y., Kornienko I. O., Bodnyak V. V.* Algorithm and software for Arduino-based system for PV module testing. *Renewable energy*. 2021. No. 1, Pp. 42–49.
7. *Amiry H., Benhmida M., Bendaoud R., et al.* Design and implementation of a photovoltaic I-V curve tracer: Solar modules characterization under real operating conditions. *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 169. Pp. 206–216.
8. *Cotfas D. T., Cotfas P. A., Ursutiu D., and Samoila C.* Current-voltage characteristic raising techniques for solar cells. Comparisons and applications. 12th

- International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. 2010. Pp. 1115–1120.
9. Duran E., Piliouguine M., Sidrach-de-Cardona M., Galan J., Andujar J. M. Different methods to obtain the I-V curve of PV modules: A review. 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference San Diego, CA, USA 2008. Pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2008.4922578>.
 10. Sarikh S., Raoufi M., Bennouna A. et al. Implementation of a plug and play I-V curve tracer dedicated to characterization and diagnosis of PV modules under real operating conditions. Energy Conversion and Management. 2020. Vol. 209. 112613, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112613>.
 11. Hansen C. W. Parameter Estimation for Single Diode Models of Photovoltaic Modules. SANDIA Report, SAND2015-2065, March 2015. 67 p. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1177157>.
 12. Gaevskaya A. Approximation algorithm for the current-voltage characteristics of PV modules in partial shading conditions. Renewable energy, 2019 (in press) (Rus.). 2019. No. 3 (58). Pp.21–29. [https://doi:10.36296/1819-8058.2019.3\(58\).21–29](https://doi:10.36296/1819-8058.2019.3(58).21–29).
 13. Gaevskii A, Method for determining parameters of PV modules in field conditions. 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), April 17–19. 2019. Kyiv, Ukraine.
 14. Humada M., Darweesh S. Y., Mohammed K. G. et al. Modeling of PV system and parameter extraction based on experimental data: Review and investigation. Solar Energy. 2020. Vol. 199, p. 742–760.
 15. Venkateswari R., Rajasekar N. Review on parameter estimation techniques of solar photovoltaic systems // International Transactions on Electrical Energy Systems. 2021. Vol. 31. No. 11.
 16. IEC 62446. Edition 1.0 2009-05. International standard. Grid connected photovoltaic systems – Minimum requirements for system documentation, commissioning tests and inspection. <https://solargostaran.com/files/standards/IEC/IEC%2062446-2009.pdf>.
 17. SIST EN 62446:2010. Grid connected PV systems. Minimum requirements for system documentation commissioning tests, and inspection requirements. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/f0f55437af90-4495-9417-d77d4266844a/sist-en-62446-2010>.