

РОЗДІЛ 6. ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ ТА ІНВЕРТОРІВ У СКЛАДІ ФЕС

В.Ю. Іванчук, студент, І.О. Корнієнко, студент, О.Ю. Гаєвський, д.ф.-м.н., проф.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра відновлюваних джерел енергії

В.В. Бодняк, аспірант, М.О. Коновалов, аспірант

Інститут відновлюваної енергетики НАН України

Вступ. Ефективність фотоелектричних модулів (ФМ) в складі сонячних електричних станцій (СЕС) суттєво залежить не тільки від рівня сонячної радіації, температури, але і від процесу старіння при експлуатації в реальних умовах. Результатом старіння ФМ під дією температурних коливань, високої вологості, інтенсивного опромінення стає погіршення їх електричних характеристик і, в першу чергу, зниження ККД [1]. Таким чином, система вимірювання поточних параметрів ФМ може надати цінну інформацію для оптимізації виробітку і резервування енергії в енергосистемі.

Основні параметри ФМ (напругу холостого ходу (ХХ) V_{oc} , струм короткого замикання (КЗ) I_{sc} і точку максимальної потужності V_m, I_m) виробники вимірюють в стандартних умовах випробувань (Standard Test Conditions, STC) [2]. Але поточний стан ФМ в процесі їх експлуатації доводиться оцінювати зазвичай на місці розташування СЕС. Тому актуальною задачею є розробка відповідної вимірювальної системи, яка має включати в себе як апаратні засоби для оперативного вимірювання в польових умовах, так і алгоритми для інтерпретації результатів вимірювань і отримання параметрів фотоелектричних модулів.

Експериментальні методи діагностики ФМ полягають, як правило, у вимірюванні вольтамперної характеристики (ВАХ) за допомогою керування струмом, який проходить через ФМ. Найбільш поширеним і економічним методом вимірювання ВАХ фотомодулів є метод змінного опору навантаження [3]. Величина активного опору змінюється приблизно від 0 до великої величини, щоб охопити всі точки ВАХ від режиму ХХ до режиму КЗ. Цей метод, застосований в даній роботі, забезпечує надійність зняття показань струму та напруги навантаження, простоту реалізації в польових умовах, а також високу оперативність при певній автоматизації процесів вимірювань, збору та обробки даних. При цьому важливо, щоб часовий інтервал між експериментальними відліками був набагато менше характерного часу зміни зовнішніх умов – радіації та температури. Слід зазначити, що сумісне використання вимірювального пристрою параметрів ФМ з аналізатором напруги на вході та виході інвертору дозволяє визначати ефективність роботи інверторів СЕС в різних радіаційних та температурних умовах.

Мета роботи. Метою даної роботи є розробка автоматизованої системи вимірювання ВАХ фотоелектричних модулів, які працюють в реальних умовах експлуатації.

Матеріали досліджень і результати розробки. Визначення електричних характеристик ФМ здійснювалось за допомогою розробленого вимірювального пристрою (Рис. 1). Магазин опорів, розрахований на максимальну потужність навантаження 250 Вт, складається з послідовно з'єднаних резисторів, які реалізують ступінчасту зміну навантаження від 0.23 Ом до 640 Ом. Комутації резисторів здійснюються за допомогою системи з 16-ти реле марки Songle SRD-05VDC-SL-C, що керуються платою Arduino Mega 2560 на базі мікроконтролера Atmel 328. Дані поступають на плату через 4-х каналний 16-розрядний АЦП ADS1115, який дає можливість суттєво підвищити точність вимірювань порівняно з використанням АЦП, вбудованого в мікроконтролерну плату.

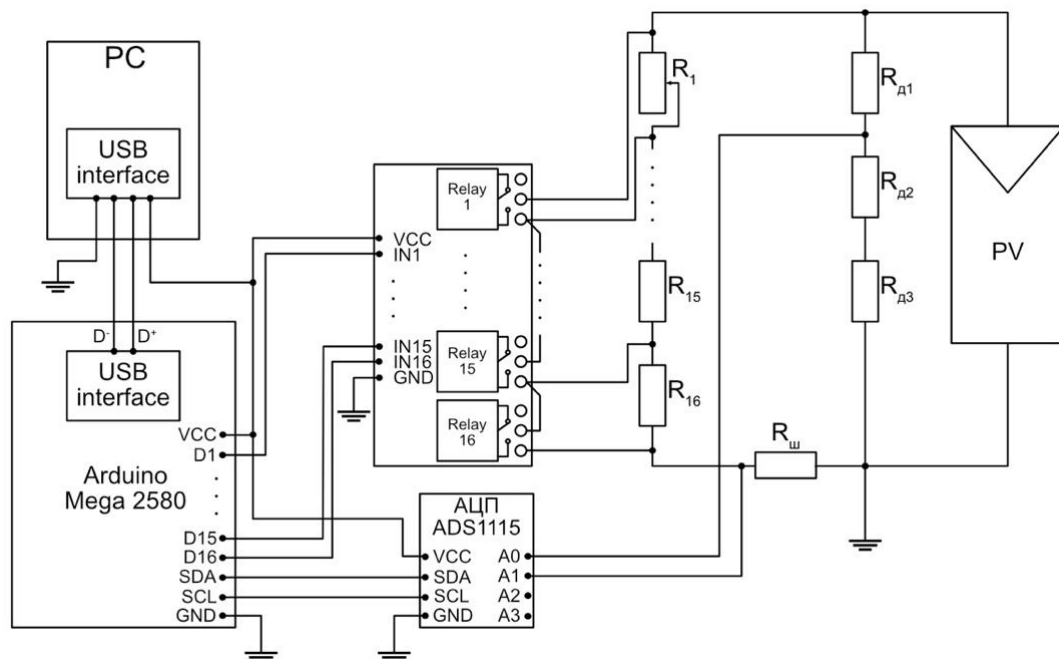


Рисунок 1 – Електрична схема вимірювального пристрою

На аналогові входи АЦП подається напруга з сумарного опору навантаження (вхід А0) через дільник напруги $R_{Д1} - R_{Д3}$ і з струмового шунта $R_{ш} = 0,23$ Ом (вхід А1), який дозволяє через падіння напруги визначити струм у навантаженні. Низький опір шунта забезпечує вимірювання також в околиці точки КЗ фотомодуля. Сигнали від АЦП подаються на відповідні входи плати Arduino Mega 2560. Управління комутацією набору реле 1 – 16 здійснюється з цифрових виходів плати D1 – D16 за певним адаптивним алгоритмом, який розраховується програмою на основі вимірювань режимів ХХ і КЗ. Експериментальні дані, отримані на протязі декількох секунд для 100 і більше точок на ВАХ, передаються через USB-інтерфейс на ПК.

Операції від початку до передачі даних на ПК виконуються сценарієм, записаному у пам'ять мікроконтролера. Передані дані піддаються попередньої обробці у середовищі MATLAB за допомогою спеціалізованої програми [4], яка виконує сортування пар значень (V, I) й апроксимацію 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 то-

чок зшивання також знаходяться в ході процедури апроксимації, яка будується на алгоритмі нелінійної оптимізації. В результаті отримується гладка неперервно-диференційована функція $I(V)$ – саме вона використовується на наступному етапі – визначення параметрів ФМ. Основні етапи збору та обробки даних відображені на блок-схемі рисунку 2.

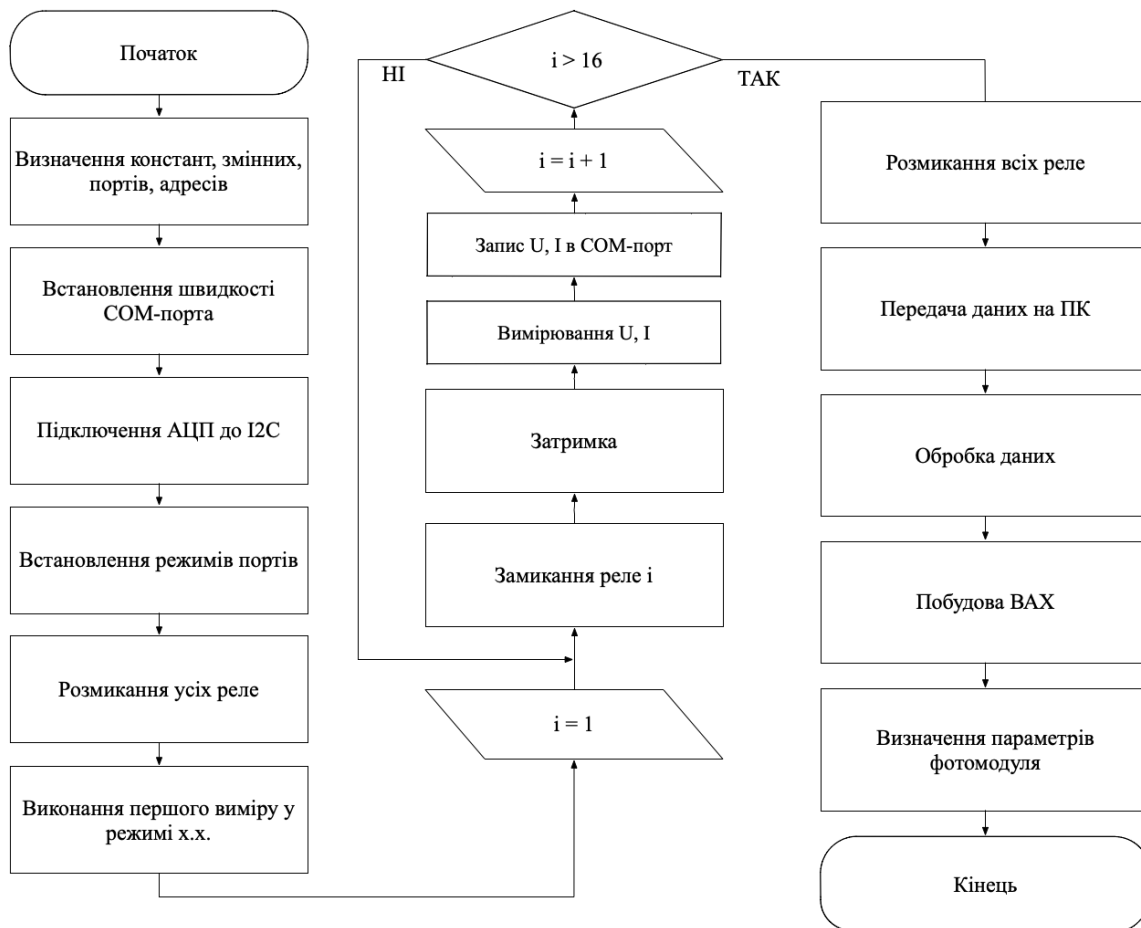


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму роботи програми

За отриманими результатами апроксимації визначаються V_{oc} , I_{sc} і точка максимальної потужності V_m , I_m (Maximum Power Point, MPP). Обчислюються також послідовне R_s і паралельне R_p опори електричних втрат [4]. Ці параметри необхідні для визначення параметрів ФМ однодіодної схеми заміщення. Для обчислення інших параметрів, а саме зворотного струму насичення I_0 та коефіцієнту неідеальності A був застосований метод та алгоритм екстракції параметрів ФМ, запропонований в роботі [5].

В результаті вимірювань двох типів ФМ потужністю 100 Вт з монокристалічного і полікристалічного кремнію були отримані ВАХ, показані на рисунку 3. Ці криві далі застосовувались для розрахунку п'яти параметрів ФМ: R_s , R_p , I_0 , A і фотоструму I_{ph} . Виходячи з обчислених параметрів і модельної функції для ВАХ однодіодної схеми заміщення будувались теоретичні ВАХ фотомодулів. Середньо-квадратичне відхилення поліноміальних апроксимант від теоретичних ВАХ склало 0,34% для моно-Si і 0,2% – для полі-Si.

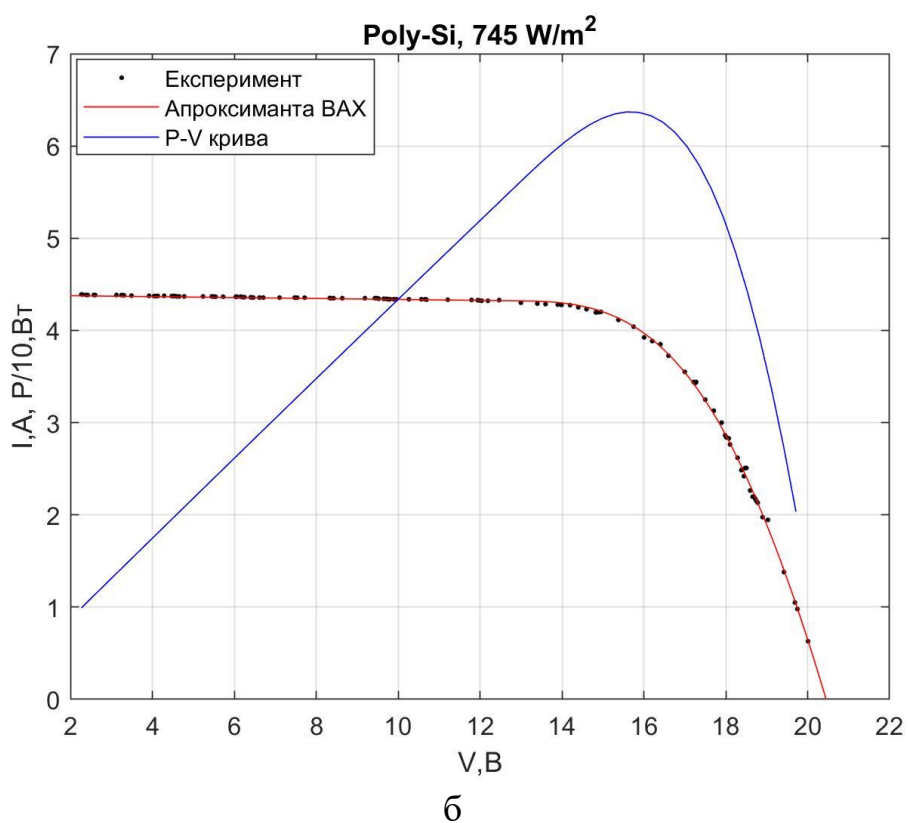
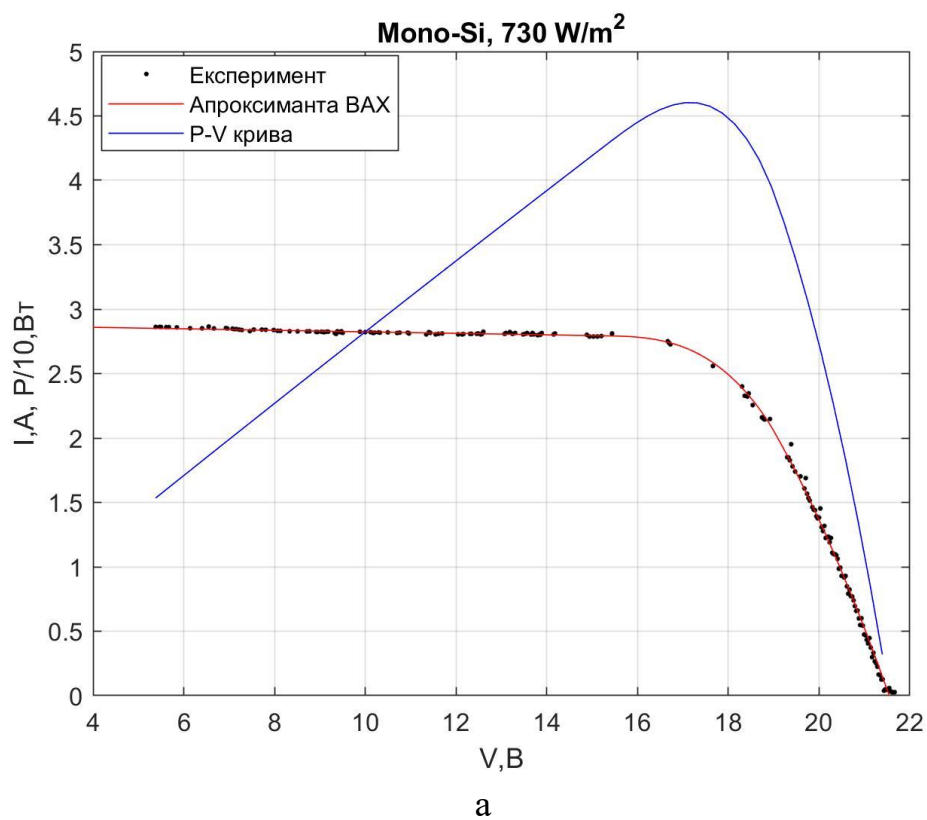


Рисунок 3 – ВАХ фотомодулів у вигляді експериментальних точок (чорні крапки) і кривих кусково-поліноміальної апроксимації (суцільні червоні лінії): а – ФМ з монокристалічного Si; б – ФМ з полікристалічного Si.

Значення параметрів фотомодулів при температурі 29°C і інтенсивності радіації 830 Вт/м² при вимірюваннях монокристалічного ФМ та 845 Вт/м² – полікристалічного ФМ складає:

для моно-Si модуля

$$I_{ph} = 4.69 \text{ A}, I_o = 5.54 \cdot 10^{-12} \text{ A}, R_S = 0.48 \text{ Ом}, R_p = 102.59 \text{ Ом}, A = 1.72$$

для полі-Si модуля

$$I_{ph} = 5.73 \text{ A}, I_o = 2.05 \cdot 10^{-10} \text{ A}, R_S = 0.47 \text{ Ом}, R_p = 132.33 \text{ Ом}, A = 1.99$$

Висновки. Розроблена вимірювальна система бюджетного рівня на основі мікроконтролерної плати Arduino дозволяє вимірювати характеристики фотоелектричних модулів у реальних польових умовах. Система забезпечує швидке отримання ВАХ ФМ з високим ступенем точності при змінних умовах сонячної радіації і температури, та при певному вдосконаленні дозволить проводити тестування ФМ безпосередньо на СЕС. За результатами аналізу поточного стану ФМ можна визначати фактичні електричні параметри ФМ, які необхідні для задач оптимізації проектних рішень для ФЕС. Окремими задачами, які можуть вирішуватися за допомогою розробленої системи, є наступні:

- пошук дефектного модулю в масиві,
- визначення ступеня старіння модулів,
- прогнозування терміну служби ФМ,
- визначення залежності параметрів ФМ від зовнішніх факторів: рівня сонячної радіації, температури, часткового затінення;
- моніторинг ефективності роботи інверторів СЕС в різних радіаційних та температурних умовах.

Перелік посилань

1. P. Manganiello, M. Balato and M. Vitelli. 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. – doi: 10.1109/TIE.2015.2418731.
2. E.R. Zuhail, Z. Rouabah, G. Kizilkanetal. Standard sand Testing Experiments for a Photovoltaic Module // European Journal of Science and Technology. Special Issue. – January 2018. – p.12-15.
3. E. Durán, M. B. Ferrera, J. M. Andújar and M. S. Mesa. I–V and P-V curves measuring system for PV modules based on DC-DC converters and portable graphical environment // 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Bari. – 2010. – p. 3323-3328. – doi: 10.1109/ISIE.2010.5637972.
4. А.Н. Гаевская. Алгоритм аппроксимации вольт-амперных характеристик фотомодулей в условиях частичного затенения // Відновлювана енергетика. – 2019. - №3(58). – с.21-29. – doi: 10.36296/1819-8058.2019.3(58).21-29.
5. Gaevskii A. Method for Determining Parameters of PV Modules in Field Conditions, 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine. – 2019. – p. 205-208. – doi: 10.1109/ESS.2019.8764239.