

УДК 621.337.1

АКТУАЛЬНІСТЬ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДІАГНОСТИКИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

Криветченко Ю.І.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків

Ефективність та надійність функціонування сонячних електростанцій (СЕС) безпосередньо залежать від безперервного контролю технічного стану їхнього електротехнічного обладнання. Незважаючи на початково високі розрахункові показники надійності, в процесі тривалої експлуатації під впливом зовнішніх факторів, кліматичних умов та режиму роботи початковий стан обладнання неминуче погіршується. Це зумовлює необхідність впровадження високоточних та автоматизованих діагностичних інструментів.

Світова тенденція вказує на перехід від періодичних інспекцій до комплексних автоматизованих систем моніторингу, які здатні підвищувати продуктивність. Наприклад, в Україні на великих об'єктах вже реалізовано унікальні цифрові системи, такі як OD.ISSAY, що дозволяють максимально автоматизувати процеси управління та аналізувати великі масиви даних, які надходять від різного обладнання. Запровадження таких систем на пілотних майданчиках, як Покровська СЕС, продемонструвало потенціал збільшення річної продуктивності до 4%. Ці системи включають автоматизовані безпілотні комплекси (дрони) з інфрачервоними камерами, що забезпечують візуальний огляд, фіксацію даних та їх передачу на хмарний портал. Це дозволяє підвищити точність діагностики обладнання до 91% та значно скоротити кількість помилкових виїздів персоналу, нівелюючи людський фактор.

Ключові проблеми, що вимагають постійної діагностики, включають деградаційні процеси, такі як потенційно індукована деградація (PID) та деградація, викликана світлом (LID), а також фізичні пошкодження.

Критично важливим є своєчасне виявлення поганих електричних з'єднань — ослаблення або окислення контактів, які можуть спричинити значні втрати енергії, локальний перегрів або навіть коротке замикання.⁴ Автоматизований моніторинг забезпечує роботу на запобігання аварійним ситуаціям, зменшуючи час простоїв та підтримуючи максимальний рівень прибутковості.

Швидке поширення фотоелектричних систем створює потребу в автоматизованих інструментах контролю їх працездатності. Локальні дефекти (відшарування, мікротріщини, термічні «гарячі точки», деградація Bypass-діодів) призводять до зниження ККД та ризику пожежі. Мікропроцесорний аналізатор дозволяє проводити періодичну або безперервну діагностику секцій батареї з мінімальними витратами, підвищуючи надійність та термін служби системи.

Традиційний аудит сонячних електростанцій включає інженерний аналіз топології, візуальний огляд, контроль опору ізоляції та огляд ручним тепловізором.⁵ Хоча тепловізійний аналіз за допомогою дронів дозволяє швидко локалізувати аномалії (гарячі точки), він надає лише якісну оцінку проблеми.

Для отримання точних кількісних даних щодо фактичної втрати потужності та ідентифікації прихованих дефектів необхідне застосування більш високоточних методів. До них належать пошук невидимих дефектів (мікротріщин) методом електролюмінесценції (EL-test) та, найголовніше, вимірювання вольт-амперної характеристики (ВАХ, або IV-test) стрингів чи окремих модулів.⁵ ВАХ-трасування є референтною методикою, оскільки дозволяє кількісно порівняти виміряні характеристики з гарантійними умовами, що є основою для подальшої гарантійної заміни дефектних сонячних батарей.

Таким чином, у системах автоматизованого моніторингу існує критична потреба в інтеграції високоточного кількісного інструментарію. Тепловізійний аналіз пропонує швидку локалізацію, проте тільки ВАХ-

трасування дає відповідь на питання про реальний відсоток втрат потужності, пов'язаних із виявленою аномалією. Розробка мікропроцесорного аналізатора (МПА), спеціалізованого на високошвидкісному ВАХ-трасуванні та інтелектуальній обробці даних, є ключовим етапом для забезпечення точної та автоматизованої діагностики, яку можна інтегрувати у загальну цифрову систему управління СЕС.6

Завдання:

- сформулювати технічні вимоги згідно з національними стандартами;
- розробити апаратну архітектуру: блоки вимірювань, джерело збудження для I–V знімання, інтерфейси зв'язку;
- реалізувати алгоритми виявлення дефектів (аналітичні + евристичні/машинне навчання при потребі);
- провести модельні випробування та підготувати методику тестування;
- оформити висновки і рекомендації для серійного виробництва.

При проектуванні слід врахувати національні версії міжнародних стандартів, що регламентують випробування та безпеку PV-модулів, зокрема ДСТУ EN IEC 61215 (вимоги та процедури випробувань для наземних PV-модулів) та ДСТУ EN IEC 61730 (вимоги щодо безпеки). Ці документи визначають процедури кліматичних і механічних випробувань та критерії безпеки, які необхідно брати до уваги при формуванні методики тестування секцій.

Огляд сучасних методів діагностики показує два основні підходи:

- фізично-обґрунтовані (аналіз I–V кривих, теплові карти);
- дані-орієнтовані (моделі машинного навчання, аналіз часових рядів).

Останні огляди та публікації підкреслюють ефективність комбінованих рішень та важливість використання локальних вимірювань струму/напруги й температури для раннього виявлення дефектів.

Практичні реалізації мікропроцесорних систем для PV-застосувань широко застосовують сімейство STM32 – існують приклади застосунок-нотаток для реалізації цифрових МРРТ та зняття характеристик, що

підтверджує придатність платформи для задач вимірювання та обробки даних в реальному часі (рис 1).

- 1) Вхідний блок вимірювань (ділянки напруги, шунти або вимірювачі струму, АЦП з ізоляцією).
- 2) Блок збудження/електронного навантаження (шляхом силового MOSFET/IGBT або DC–DC перетворювача з керуванням).
- 3) Контролер (мікроконтролер STM32F4/STM32G4 або інший з достатньою кількістю АЦП та периферії).
- 4) Блок збирання температури (терморезистори, термопари) і датчик інсоляції (фотодіод або руганometer для калібрування).
- 5) Модуль зв'язку і живлення.

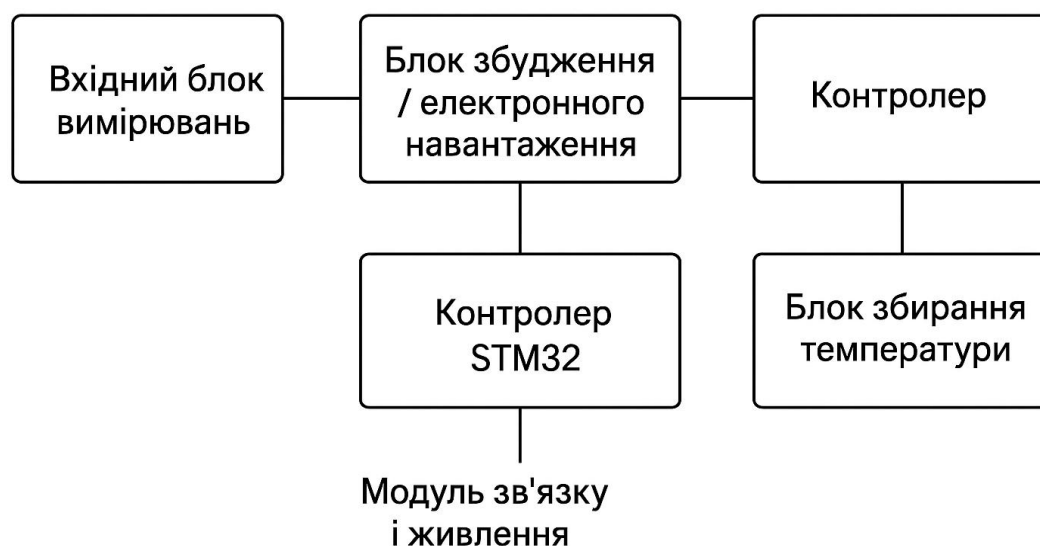


Рисунок 1 – Апаратна реалізація мікропроцесорного блоку

Висновки: Розробка мікропроцесорного аналізатора для автоматизованої діагностики секцій сонячних батарей є технічно здійсненою та економічно доцільною при дотриманні нормативних вимог. Поєднання аналітичних алгоритмів (I–V аналіз, термодіагностика) з опціональними методами машинного навчання підвищує точність і ранність виявлення дефектів. Рекомендовано подальшу реалізацію прототипу на базі сімейства STM32 з подальшою сертифікацією згідно ДСТУ EN IEC 61215/61730.

Однією з основних вимог до зняття ВАХ є стабільність зовнішніх умов (опромінення, температура). Чим швидше відбувається трасування, тим меншою є похибка, спричинена зміною сонячного потоку. Використання ємнісного методу забезпечує високу швидкість трасування (в межах мілісекунд), що дозволяє мінімізувати вплив нестабільного опромінення. Це, у свою чергу, диктує необхідність застосування надшвидкого АЦП з частотою дискретизації 100 kSps або вище для точного захоплення динамічного процесу заряду. Таким чином, ємнісне трасування забезпечує оптимальний компроміс між швидкістю, точністю та складністю польової реалізації.

Література:

1. Mellit, A., Benganem, M., Kalogirou, S., & Pavan, A. M. An embedded system for remote monitoring and fault diagnosis of photovoltaic arrays using machine learning and the internet of things. *Renewable Energy*. 2023. Т. 208. С. 399–408.
2. Діагностика фотоелектричних модулів та обладнання сонячних електростанцій / Інтернет – конференції ХНУМГ ім.О.М.Бекетова, 2025.
3. ДСТУ EN IEC 61215-1:2022 — Наземні фотоелектричні (PV) модулі. Атестація конструкції та схвалення типу. Частина 1. Вимоги до випробувань. (національний стандарт, наближений до IEC 61215). online.budstandart.com
4. ДСТУ EN IEC 61215-2:2022 — Наземні фотоелектричні (PV) модулі. Атестація конструкції та затвердження типу. Частина 2. Процедури випробувань. online.budstandart.com
5. ДСТУ EN IEC 61730-1:2018 / 61730-2:2018 – Оцінка безпеки фотоелектричних модулів. Вимоги до конструкції та процедури випробувань. online.budstandart.com+1
6. Liu Y., et al., Fault diagnosis of photovoltaic modules: A review, *Solar Energy*, 2025

7. STMicroelectronics, AN5324 — Using the STM32F334 microcontroller embedded high-resolution timer to implement a 1MHz LLC-topology digital MPPT solar converter (application note).