

АНАЛІЗ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ЕФЕКТУ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ У СИСТЕМАХ SMART GRID

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі проведено глибокий аналіз фізичних процесів перетворення світлової енергії в електричну на основі явища внутрішнього фотоелектричного ефекту. Розглянуто математичну модель вольт-амперної характеристики (ВАХ) фотомодуля та вплив зовнішніх факторів на ККД системи. Особливу увагу приділено алгоритмам пошуку точки максимальної потужності (MPPT) як ключового елементу інтеграції сонячних станцій у «розумні» мережі Smart Grid.

Ключові слова: фотоелектричний ефект, сонячна інсоляція, MPPT-контролер, Smart Grid, напівпровідниковий р-п перехід, енергоефективність.

Abstract

The paper provides an in-depth analysis of the physical processes involved in converting light energy into electrical energy based on the phenomenon of the internal photoelectric effect. The mathematical model of the current-voltage (I-V) characteristic of a photovoltaic module and the influence of external factors on the system efficiency are examined. Particular attention is paid to Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms as a key element in the integration of solar power plants into Smart Grids.

Keywords: photoelectric effect, solar insolation, MPPT controller, Smart Grid, semiconductor p-n junction, energy efficiency.

Вступ

Сучасна електроенергетика перебуває на етапі переходу від централізованих систем до розподіленої генерації. Ключову роль у цьому процесі відіграють фотоелектричні станції (ФЕС). Проте, на відміну від традиційної генерації, сонячна енергія має стохастичний (випадковий) характер [3]. Зокрема, у хмарну погоду пряме сонячне світло розсіюється, що критично змінює умови роботи фотоелементів та потребує аналізу ефективності за зниженого рівня освітленості [1]. Для забезпечення стабільності мережі необхідно не лише розуміти фізику процесів у напівпровідниках, а й використовувати інтелектуальні системи керування потужністю.

Метою дослідження є деталізація фізико-технічних параметрів сонячних панелей та обґрунтування методів їх оптимізації для стабільної роботи в мережах Smart Grid.

Фізичні основи фотоелектричного перетворення

Робота сонячного елемента базується на внутрішньому фотоелектричному ефекті, що виникає в напівпровідниковій структурі з р-п переходом [1]. Коли фотон світла з енергією E_{ph} падає на поверхню кремнію, він поглинається, якщо його енергія перевищує ширину забороненої зони напівпровідника (E_g) [2]:

$$E_{ph} = h \cdot \nu \geq E_g$$

де h — стала Планка, ν — частота світлового випромінювання.

В результаті поглинання фотона утворюється пара носіїв заряду: електрон та дірка. Внутрішнє електричне поле р-п переходу розділяє ці заряди, створюючи різницю потенціалів на виводах елемента. Процес р-п переходу зображений на рисунку 1.

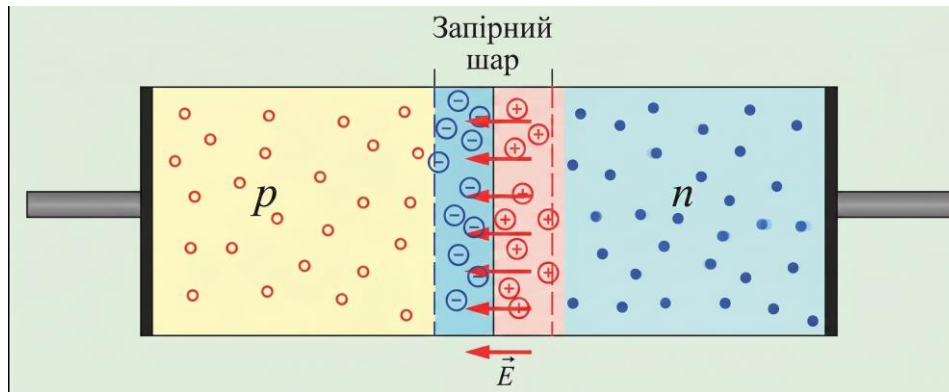


Рисунок 1. Схематичне зображення р-n переходу та формування запірнього шару в напівпровіднику

Математична модель та аналіз ВАХ

Для оцінки ефективності панелі використовується еквівалентна схема заміщення, яка враховує струм фотогенерації (I_{ph}) струм діода (I_d) та втрати на внутрішніх опорах. Основне рівняння вихідного струму I сонячної комірки має вигляд[2]:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right]$$

де:

- I_s — струм насичення діода;
- q — заряд електрона;
- k — стала Больцмана;
- T — абсолютна температура;
- n — коефіцієнт ідеальності діода.

Головною проблемою є те, що при зміні інтенсивності сонячного випромінювання (інсоляції) змінюється струм (див. рис. 2), а при зміні температури — напруга (див. рис. 3). Це призводить до постійного зміщення робочої точки, в якій панель віддає максимум енергії.

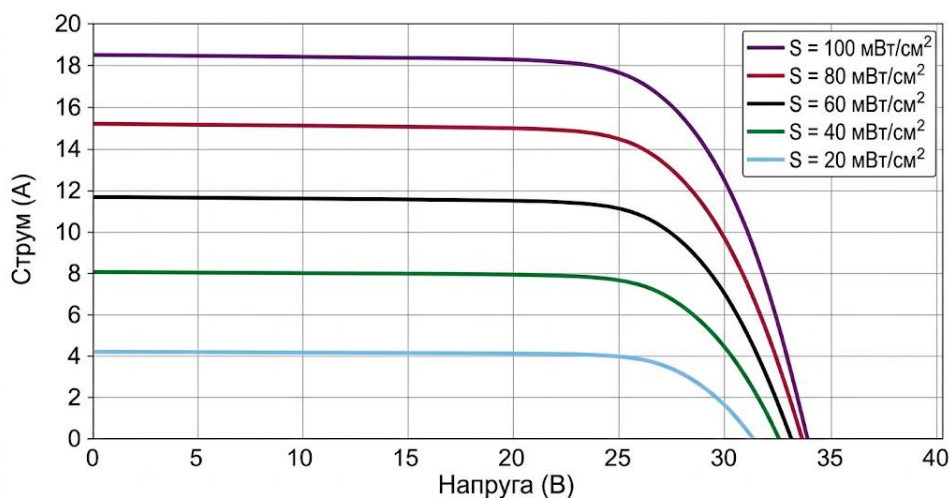


Рисунок 2. Вольт-амперні характеристики сонячного елемента при різних рівнях інсоляції S за сталої температури $25\text{ }^{\circ}\text{C}$

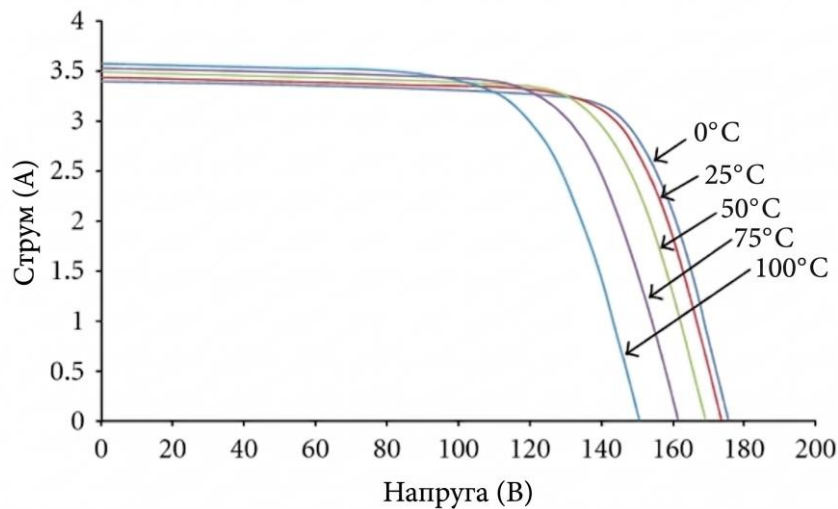


Рисунок 3. Вольт-амперні характеристики (ВАХ) сонячного елемента при різних температурах навколишнього середовища.

Оптимізація через технології Smart Grid

Smart Grid — це модернізована мережа електропостачання, яка використовує цифрові комунікаційні технології для двостороннього обміну як енергією, так і даними між виробниками та споживачами. Вона забезпечує безперешкодну інтеграцію відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) шляхом активного моніторингу та балансування системи в реальному часі [3]. У контексті ФЕС оптимізація та нівелювання стохастичності генерації реалізується на трьох взаємопов'язаних рівнях:

1. Локальний рівень (MPPT-контролери): Безпосередньо на місці генерації використовуються контролери пошуку точки максимальної потужності (Maximum Power Point Tracking). Алгоритми (наприклад, *Perturb and Observe* або метод інкрементної провідності) з високою частотою сканують ВАХ панелі, штучно змінюючи опір навантаження так, щоб добуток поточних U та I завжди давав максимум:

$$P_{max} = U_{mpp} \cdot I_{mpp}$$

Це дозволяє миттєво реагувати на проходження хмар чи локальне затінення фотомодулів [1].

2. Об'єктовий рівень (Інтелектуальні інвертори): У системах Smart Grid інвертори перетворюють не лише форму струму, а й виконують функції підтримки стабільності локальної мережі (Ancillary Services). При масовій генерації ФЕС виникає проблема перенапруги в точках підключення. Розумні інвертори застосовують алгоритми локального регулювання Volt-VAR та Volt-Watt. Якщо напруга в мережі перевищує критичну межу через надлишок сонця, інвертор автоматично починає споживати надлишкову реактивну потужність або плавно обмежувати активну генерацію, запобігаючи аварійним вимкненням захисної апаратури.

3. Мережевий рівень (Віртуальні електростанції VPP та ШІ-прогнозування): Для вирішення проблеми системного дисбалансу (наприклад, денного надлишку енергії, відомого як «качка графіка навантаження» або *Duck Curve*) Smart Grid об'єднує сотні розподілених ФЕС, системи накопичення енергії (BESS) та керовані навантаження у єдину цифрову структуру — Віртуальну електростанцію (Virtual Power Plant — VPP).

Завдяки хмарним сервісам та алгоритмам машинного навчання здійснюється короткострокове прогнозування генерації на основі аналізу супутникових метеоданих. Якщо ШІ прогнозує різке падіння інсоляції через фронтальну хмарність, Smart Grid завчасно віддає команду на накопичення енергії в акумуляторах або активує системи керування попитом (Demand Response), стимулюючи споживачів знизити навантаження через динамічні гнучкі тарифи.

Висновки

Проведений аналіз та математичне моделювання показали, що ефективність сонячної генерації визначається не лише внутрішньою структурою напівпровідникових матеріалів, а й динамічним обчислювальним керуванням електричними параметрами системи на різних рівнях. На основі отриманих розрахункових даних та аналізу сімейства вольт-амперних характеристик (ВАХ) сформуовано такі висновки:

- Кількісна оцінка температурної деградації: Фізичні обмеження кремнієвих елементів призводять до значних втрат потужності при відхиленні від оптимального теплового режиму. Графічний аналіз показав, що при зростанні температури фотомодуля від 0 °C до 100 °C напруга U лінійно зменшується з орієнтовних 180 В до 150 В (загальне падіння становить понад 15%). При цьому вихідний струм залишається відносно стабільним у діапазоні 3,4–3,6 А, що підтверджує першочерговий вплив температури саме на потенціал напівпровідникового р-п переходу.
- Експериментальна залежність від рівня інсоляції: Досліджено, що вихідний струм сонячної комірки перебуває у прямій пропорційній залежності від щільності світлового потоку. Зниження рівня інсоляції S від еталонних 100 мВт/см² (1000 Вт/м²) до критичних 20 мВт/см² (200 Вт/м²) викликає стрімке падіння струму I у 4.5 рази — з 18 А до 4 А. Водночас зміна напруги є менш вираженою і становить близько 10% (зсув від 34 В до 31 В), що обґрунтовує необхідність застосування систем штучного регулювання опору навантаження.
- Ефективність динамічного пошуку екстремуму (MPPT): Безперервне обчислення точки максимальної потужності дозволяє утримувати робочу точку на вигині («колiні») кривої ВАХ в реальному часі. Математично доведено, що швидка адаптація інвертора до змінних параметрів дозволяє компенсувати до 30% втрат сумарної електричної енергії, які виникають внаслідок динамічної хмарності, затiнення та спектральних спотворень випромiнювання [1].
- Системна синергія в середовищі Smart Grid: Інтеграція фотоелектричних систем у «розумні» мережі трансформує сонячну генерацію з пасивного стохастичного джерела на активний вузол керування. Впровадження алгоритмів *Volt-VAR* та *Volt-Watt* на рівні інтелектуальних інверторів забезпечує автоматичне поглинання надлишку реактивної потужності під час пікової інсоляції (100 мВт/см²), стабілізуючи локальну напругу та частоту. Це мінімізує ризики аварійних вимкнень захисної апаратури та дозволяє інтегрувати масиви ФЕС у структуру Віртуальних електростанцій (VPP) для надійного довгострокового балансування енергосистеми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Коробейнікова О.А. Мартинюк В. В. Фізика ефективних сонячних панелей у хмарну погоду: Матеріали науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ (Факультет електроенергетики та електромеханіки). Вінниця : ВНТУ, 2026. (дата звернення: 12.05.2026).
2. Nelson J. The Physics of Solar Cells. London : Imperial College Press, 2003. 350 p.
3. Ekanayake J. et al. Smart Grid: Technology and Applications. Chichester : Wiley, 2012. 302 p.

Лисий Костянтин Андрійович — студент групи 2ПІ-256, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: garoshh1818@gmail.com

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович**, Доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Lysi Kostiantyn A. — Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email : garoshh1818@gmail.com

Scientific supervisor: **Martyniuk Volodymyr Valeriyovych**, Associate Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.