

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу

Іванчука Владислава Юрійовича

на тему «Визначення параметрів фотоелектричних батарей в польових умовах»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 14 Електрична інженерія

за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Актуальність теми дисертації.

Сучасна сонячна енергетика переживає період експоненційного зростання, демонструючи найкращу динаміку розвитку серед усіх можливих систем відновлюваної енергетики у світі. За останнє десятиліття встановлена потужність фотоелектричних станцій (ФЕС) зросла від одиниць до понад 1000 ГВт. Згідно з прогнозами, до 2050 року сонячна енергетика може забезпечити до 45% світового споживання електричної енергії.

Високі інвестиційні витрати на ФЕС (від \$800 до \$1200 за кВт встановленої потужності) роблять критично важливою точну оцінку їх ефективності та довговічності. Зважаючи на те, що більшість фотоелектричних проектів розраховані на 25-30 років експлуатації і вимагають значних інвестицій, навіть невелика похибка в оцінці параметрів фотомодулів (ФМ), може призвести до значних економічних втрат. Особливо важливою вказана обставина є в процесі визначення їх параметрів під час експлуатації, умови якої в значній мірі відрізняються від лабораторних, тому питання, присвячені оцінці стану ФМ при різних рівнях сонячної радіації та навантаження, *є актуальним науковим завданням.*

В наведеній дисертаційній роботі виконані дослідження для визначення змінних параметрів ФМ, на основі яких розв'язане актуальне наукове завдання, що полягає в оцінці стану промислових ФМ в умовах їх експлуатації шляхом створення моделі поведінки вольт-амперних характеристик (ВАХ), з урахуванням впливу фізичних процесів в напівпровідникових матеріалах при різних рівнях сонячної радіації та навантаження.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Вирішення поставлених у роботі завдань досліджень, здійснювалося з використанням відомих законів теорії електричних кіл на постійному струмі,

фізичної теорії напівпровідникових матеріалів та p - n -переходів в фотоелектричних елементах, математичних методів оптимізації та апроксимації, методів статистичної робастної обробки експериментальних даних.

Узгодження цих результатів підтверджує адекватність запропонованих математичних моделей та результатів, що були одержані аналітичними методами. Отже, методи дослідження відповідають поставленим завданням і забезпечують ефективне їх розв'язання та досягненої у роботі мети. Наведені аргументи дають змогу визнати наукові результати, що були одержані аналітичними методами.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

- розроблено нову теоретичну модель для визначення на основі ВАХ параметрів ФМ, що мають змінний характер в широкому діапазоні напруги, яка, на відміну від відомих моделей з фіксованими параметрами, відображає складний фізичний характер формування струму в фотоелектричних елементах.

- отримані аналітичні залежності, які дозволяють при визначенні параметрів ФМ розділити частку електричних втрат та рекомбінаційних процесів у формування ВАХ.

- встановлено, що в області прямої напруги нижче точки максимальної потужності ВАХ ФМ, коефіцієнт ідеальності може значно перевищувати 2, що пов'язано з рекомбінацією на мікроструктурних та поверхневих дефектах сучасних промислових ФМ.

Практичне значення отриманих результатів полягає у:

- розробці автономної автоматизованої вимірювальної системи, що дозволяє отримувати в польових умовах якісні ВАХ ФМ одночасно з фіксацією іррадіації та температури модуля, а також визначати в реальному часі параметри ФМ;

- запровадженні комплексного адаптивного робастного алгоритму фільтрації даних на основі ковзних середніх та двоетапної апроксимації експериментальних ВАХ ФМ, що враховує особливості роботи ФМ у поточних змінних зовнішніх умовах та дозволяє забезпечити необхідну точність для подальших розрахунків та аналізу;

- розробці методики визначення змінних параметрів ФМ на основі експериментальних ВАХ, що базується на отриманих аналітичних залежностях та запропонованій моделі.

Робота безпосередньо пов'язана із науковою тематикою, яка виконувалась на кафедрі нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії КПІ ім. Ігоря Сікорського. Результати роботи використані ІВЕ НАН України при виконанні

дослідних робіт з шифром «Комплекс-3» (ДР № 0118U003385) та «Комплекс-Інтегро» (ДР № 0123U100782), а також передані кафедрі відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» для використання у навчальному процесі при проведенні лекційних занять, практичних та лабораторних робіт з дисциплін «Фотоенергетика» та «Фотоелектричні станції» (бакалаврський рівень), а також у дипломному проектуванні за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання, що полягає в забезпеченні належного рівня оцінки стану промислових фотоелектричних модулів в реальних умовах їх експлуатації шляхом створення теоретичної моделі поведінки вольт-амперних характеристик з урахуванням фізичних процесів в напівпровідникових матеріалах при різних рівнях навантаження і сонячної радіації та розробки засобів вимірювання і обробки вольт-амперних характеристик в польових умовах, виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Іванчука В.Ю. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у галузь знань 14 «Електрична інженерія».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Іванчука Владислава Юрійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою. Дослідження відповідає основній темі дослідження і представлено у послідовній та доступній формі. Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації 159 сторінок.

У вступі дисертації обґрунтовано актуальність теми, визначено мету і задачі досліджень, підкреслено наукову новизну і практичне значення отриманих

результатів, розглянуто особистий внесок здобувача та наведено апробацію результатів.

У *першому розділі* автором проведено літературно-патентний пошук за темою дисертаційного дослідження та виконано оцінку загального стану і світових тенденцій розвитку галузі. Розглянуто існуючі методи моделювання фотоелектричних елементів за допомогою еквівалентних заступних схем, визначено наявні аналітичні та метаевристичні підходи до екстракції параметрів ФМ. Проаналізовано основні недоліки сучасних методів моделювання, а саме високі вимоги до обчислювальних ресурсів, спрощення складних фізичних процесів формування струму у фотоелектричних елементах до суперпозиційних моделей і, як результат, недостатню відповідність моделей реальним експериментальним дослідженням.

У *другому розділі* обґрунтовано необхідність розробки системи вимірювання ВАХ ФМ в польових умовах та розглянуто особливості процесу їх тестування. Розроблено та виготовлено автоматизовану систему вимірювання ВАХ ФМ на основі мікрокомп'ютера Raspberry Pi методом заряджання ємності разом з відповідним програмним забезпеченням. Обрано оптимальну конфігурацію навантажувальної частини, спроектовано та виготовлено основні складові вимірювальної системи. Виконано експериментальні дослідження ФМ в польових умовах, в результаті яких отримано більше тисячі вимірів в змінних навколишніх умовах при різному рівні іррадіації від 50 до 900 Вт/м².

У *третьому розділі* розроблено комплексний адаптивний робастний алгоритм фільтрації експериментальних даних, що дозволяє усунути вплив можливих радіаційних та температурних флуктуацій, притаманних вимірюванням в польових умовах. Досліджено прояви резистивних втрат та рекомбінацій носіїв на ВАХ промислових кремнієвих ФМ. Розроблено теоретичну модель для визначення їх параметрів при різних зовнішніх умовах сонячної радіації та температури. Визначено аналітичні залежності параметрів ФМ від напруги, а саме фактору ідеальності та зворотного струму насичення. Розроблено методику та програмне забезпечення, що дозволило вперше застосувати запропоновану однодіодну модель фотоелектричного елемента зі змінними параметрами для опису ВАХ ФМ з нормалізованим середньоквадратичним відхиленням $nRMSE \sim 2 \cdot 10^{-3}$ і коефіцієнтом кореляції R^2 в межах $0.99994 \div 0.99999$.

Загальні висновки містять узагальнення отриманих наукових та практичних результатів дисертаційного дослідження.

У *додатках* до дисертації наведено програмний код розроблених алгоритмів, електричні схеми системи вимірювання, зовнішній вигляд створеної системи та акти впровадження результатів дисертаційної роботи в наукові організації та навчальні заклади.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертації висвітлені у 7 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 5 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України та проіндексовані у періодичних наукових виданнях наукометричної бази даних *Scopus*. Також результати дисертації були апробовані на 2 наукових фахових конференціях.

Публікації повністю відповідають тематиці дисертації та містять оригінальні результати здобувача, що включені у роботу. Здобувач дотримувався академічної доброчесності: плагіату не виявлено, всі джерела належно цитовані. Особистий внесок підтверджує авторство здобувача у представлених наукових висновках.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Кількість завдань досліджень, що ставляться на початку роботи, значно перевищує існуючі вимоги до дисертацій докторів філософії. Вважаю, що можна було звужити завдання досліджень для більш глибокого розгляду певних питань, наприклад більш детально дослідити поведінку змінних параметрів при екстремальних умовах експлуатації.

2. Експериментальні дослідження проводились переважно на кремнієвих модулях, тоді як на сьогодні існують і інші технології, а саме CIGS, перовскітні, гетероперехідні тощо, параметри яких можуть суттєво відрізнятися.

3. У роботі не вказано чіткі межі застосовності розробленої моделі зі змінними параметрами для різних умов експлуатації та типів деградації ФМ.

4. Відсутнє детальне порівняння розробленої вимірювальної системи з існуючими комерційними приладами за точністю, швидкістю та функціональними можливостями.

5. Експериментальна перевірка проводилась на обмеженій кількості типів ФМ і в певних кліматичних умовах, що негативно вплине на універсальність висновків.

6. При проведенні дослідження не розглянуто поведінку змінних параметрів при тривалій експлуатації ФМ та їх деградації протягом років.

7. Наукове завдання в анотації роботи відрізняється від наукового завдання у загальних висновках, після кожного з розділів відсутні висновки, що утруднює розуміння суті розділу.

8. В тексті зустрічаються некоректні терміни: «електричний ланцюг» замість *електричне коло*; не наведене належне визначення терміну «фотострум» так як воно не є загальновідомим; «схема заміщення» замість *заступна схема* тощо.

Висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Іванчука Владислава Юрійовича на тему «Визначення параметрів фотоелектричних батарей в польових умовах» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 14 «Електрична інженерія». Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Іванчук Владислав Юрійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Рецензент:

Професор кафедри
відновлюваних джерел енергії
КПІ ім. Ігоря Сікорського,
д-р. техн. наук, професор



Олександр ОСТАПЧУК

« 3 » серпня 2025 року

