

## **ВІДГУК**

офіційного опонента 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.**

Сонячна енергія, як складова чистої енергетики, посіла провідне місце серед відновлюваних джерел завдяки екологічній безпечності, доступності та високому потенціалу розвитку. Фотоелектричні (ФЕ) системи, які здійснюють пряме перетворення сонячного випромінювання в електроенергію, стрімко набувають популярності у світі. Їхня перевага полягає у простоті встановлення, тривалій експлуатаційній ефективності та економічній доцільності порівняно з традиційними енергетичними технологіями. Сьогодні спостерігається помітне зростання частки ФЕ систем в енергетичному балансі багатьох країн, зокрема і України, що свідчить про загальносвітову тенденцію переходу збільшення частки енергії з відновлювальних джерел енергії. Водночас ефективність експлуатації фотоелектричних модулів суттєво залежить від їхнього стану, який змінюється під впливом зовнішніх факторів – сонячної радіації, температури, навантаження та вікової деградації матеріалів. Більшість фотоелектричних модулів експлуатуються у змінних кліматичних умовах протягом багатьох років, тому виникає потреба в точних та доступних методах оцінки поточного стану фотоелектричних модулів в реальних умовах їх експлуатації.

Ефективність роботи фотоелектричних модулів залежить від їх технічного стану, який у свою чергу залежить від внутрішніми втратами, рекомбінаційними процесами та структурними дефектами. Ці зміни мають складні залежності, які не враховуються не враховуються класичними моделями, що ускладнює коректне моделювання процесів, які відбуваються в фотоелектричних модулях виготовлених за сучасними технологічними процесами, проведення прогнозування їх роботи в системі та діагностику. Тому актуальною є розробка моделей вольт-амперних характеристик, які відображають вплив умов освітлення та навантаження на фізичні процеси у напівпровідниках фотоелектричних модулів, а також створення портативних засобів на базі мікрокомп'ютера для оперативного збору та обробки експериментальних даних у польових умовах, здатних в реальному часі аналізувати параметри фотоелектричних модулів. Реалізація подібних рішень дозволить підвищити точність прогнозування ефективності сонячних станцій,

зменшити експлуатаційні витрати та продовжити термін служби обладнання, покращити точність моделювання, виявити дефекти на ранніх етапах та оптимізувати роботу станцій.

Отже дисертаційне дослідження Іванчука В.Ю. є актуальною та перспективною роботою, яка відповідає сучасним викликам галузі сонячної енергетики, поєднуючи фундаментальні наукові дослідження з ефективними практичними інженерними рішеннями.

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Розроблено нову теоретичну модель для визначення на основі вольт-амперної характеристики параметрів фотоелектричних модулів, 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.

2. Отримано аналітичні залежності, які дозволяють при визначенні параметрів фотоелектричних модулів розділити вклади електричних втрат та рекомбінаційних процесів у формування вольт-амперної характеристики.

3. Встановлено, що в області прямої напруги нижче точки максимальної потужності вольт-амперної характеристики фотоелектричних модулів, коефіцієнт ідеальності може значно перевищувати 2, що пов'язано з рекомбінацією на мікроструктурних та поверхневих дефектах сучасних промислових фотоелектричних модулів.

Достовірність наукових положень та результатів роботи, що містяться в дисертаційній роботі Іванчука В.Ю., обґрунтована і забезпечена коректністю використання математичного апарату, наукових положень та достатньою кількістю експериментальних досліджень. Представлена дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням. Зміст дисертації та повнота розв'язаних задач цілком відповідають темі роботи.

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

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Практична цінність результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Розроблено автономну автоматизовану вимірювальну систему, яка дозволяє отримувати в польових умовах якісні вольт-амперні характеристики фотоелектричних модулів одночасно з фіксацією іррадіації та температури модуля, а також визначати в реальному часі параметри ФМ;

2. Розроблено комплексний адаптивний робастний алгоритм фільтрації даних на основі ковзних середніх та двоетапної апроксимації експериментальних вольт-амперних характеристик фотоелектричних модулів, що враховує особливості роботи фотоелектричних модулів у поточних змінних зовнішніх умовах та дозволяє забезпечити необхідну точність для подальших розрахунків та аналізу;

3. Розроблено методику визначення змінних параметрів фотоелектричних модулів на основі експериментальних вольт-амперних характеристик, що базується на отриманих аналітичних залежностях та запропонованій моделі.

Наукові та практичні результати роботи використані в Інституті відновлюваної енергетики НАН України при виконанні науково-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.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Іванчука Владислава Юрійовича 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 науковий напрям технічних наук.

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, копіювання, 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.

Структура дисертації побудована відповідно до мети та задач дослідження. Викладення основного матеріалу дисертації, наукових положень, результатів та висновків виконано технічною мовою із використанням загальноприйнятої наукової термінології, логічне та аргументоване. Дисертація написана в науковому стилі.

Дисертаційна робота Іванчука В.Ю. є завершеною науковою працею. Робота складається з анотацій (українською та англійською мовами), вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, що налічує 162 найменування, та десяти додатків. Загальний обсяг дисертації складає 159 сторінок. Робота добре проілюстрована 47 рисунками і 5 таблицями.

*Анотація* відображає основні положення дисертації, стисло характеризує зміст дисертаційної роботи та не містить інформації, відсутньої в основному тексті роботи.

У *вступі* обґрунтована актуальність і важливість обраної теми дослідження, сформульовано мету та завдання дослідження, об'єкт, предмет та методи дослідження, наведено перелік використаних методів і зв'язок з відповідними науковими темами, подано наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів, а також відомості про наявні публікації та апробацію.

У *першому розділі «Основні відомості про фотоелектричні елементи та огляд літератури»* подано узагальнену інформацію про типи фотоелектричних елементів, фізичні процеси, що відбуваються в них під час освітлення, та основні характеристики фотоелектричних модулів. Детально розглядаються різновиди еквівалентних схем заміщення – однодіодні, дводіодні, тридіодні моделі та інші моделі. Також проаналізовано сучасні методи визначення параметрів ФМ, зокрема аналітичні та метаевристичні підходи, що є важливими для розробки достовірних моделей.

У *другому розділі «Система вимірювання ВАХ ФМ та її функціональне призначення»* обґрунтовано потребу у створенні системи вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних модулів, наведено огляд існуючих методів та обґрунтовано вибір архітектури запропонованої системи. Детально описано компоненти вимірювального та навантажувального контурів, зокрема вибір і параметри конденсаторів, засоби вимірювання струму й напруги, силову частину керування та мікрокомп'ютерне забезпечення. Окремо розглянуто функціонування системи в польових умовах, питання автономного живлення,

передачі даних та захисту, що забезпечує її практичну придатність для моніторингу фотоелектричних модулів реальних польових умовах.

*Третій розділ «Моделювання характеристик фотомодулів»* присвячено розробці математичних і алгоритмічних методів для обробки та моделювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних модулів. Представлено комплексну процедуру фільтрації та апроксимації експериментальних даних, що включає медіанне згладжування, адаптивне LOWESS-гладження та нормалізацію кривих. Проаналізовано фізичні механізми рекомбінаційних втрат у фотоелектричних модулях, зокрема рекомбінацію Шоклі-Ріда-Холла, поверхневу та крайову рекомбінацію, а також вплив мікроструктурних дефектів. Запропоновано новий підхід до моделювання, що враховує змінні параметри, такі як коефіцієнт ідеальності, струму через діод та зворотній струм насичення, що дозволяє відображати реальну поведінку промислових фотоелектричних модулів.

*Висновки* по дисертаційній роботі логічно випливають з описаних результатів досліджень та відповідають змісту дисертаційної роботи, підкреслюють наукову новизну та практичну цінність проведених досліджень.

*Список використаних джерел* охоплює сучасні вітчизняні та закордонні публікації за темою дисертаційних досліджень.

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

Матеріал дисертації викладено логічно, усі розділи мають свою специфіку, котра у сукупності свідчить про цілісність та завершеність дисертаційної роботи.

Таким чином, представлена дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, яка написана науковою мовою. Зміст, послідовність та повнота розв'язаних задач цілком відповідають як темі роботи так і затвердженим вимогам до написання дисертаційних досліджень МОН України.

### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи**

Наукові результати дисертації висвітлені у 7 наукових публікаціях здобувача, серед яких 5 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України, в т.ч. 5 статей у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus.

Також результати дисертації були апробовані на 2 наукових фахових конференціях.

Представлені публікації відображають результати проведених наукових досліджень у межах дисертаційної роботи. За ступенем новизни, обґрунтованістю та достовірністю результатів, повнотою їх викладення в опублікованих здобувачем наукових працях, робота має високе науково-

прикладне значення. Здобувач дотримувався принципів академічної доброчесності, що підтверджується відсутністю плагіату в публікаціях. Всі використані в роботі ідеї, тексти та результати інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела. Особистий внесок здобувача, що відображений у цих публікаціях і описаний у дисертації, підтверджує його авторство у відповідних наукових висновках.

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

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

Загалом представлену дисертаційну роботу можна характеризувати як комплексне науково-прикладне дослідження, але варто відмітити декілька зауважень:

1. Перший розділ містить відому інформацію, яку краще було б подати у вигляді таблиць з порівнянням недоліків та переваг для типів фотоелектричних елементів, схем заміщення, а також методів визначення параметрів фотоелектричних модулів.
2. В першому розділі наведені схем заміщення (розділ 1.4 на сторінці 30) та методів визначення параметрів фотоелектричних модулів (розділ 1.5 на сторінці 38), але в наступних розділах дисертації відсутнє пряме порівняння з використанням експериментальних даних наведених еквівалентних схем заміщення.
3. На сторінці 57 в розділі 2.5.1 відсутня аргументація вибору використаного аналого-цифрового перетворювача. Також на сторінці 58 вказано «2140 відділків на секунду з точністю nRMSE 0.014927 в тестових умовах», що потребує обґрунтування або уточнення отриманої точності.
4. В розділі 2.8 на сторінці 70 вказано, що експериментальні дослідження проводилися з використанням різних типів фотоелектричних модулів. Але в розділі 3.4.2 на сторінці 101 використовується лише монокристалічний фотоелектричний модуль Risen RSM60-6-280P. Доцільно було б навести розширену вибірку розрахунків, включивши дослідження з більшою кількістю фотоелектричних модулів для більш ґрунтовного оцінювання ефективності запропонованої моделі та розробленої вимірювальної установки.
5. В роботі не представлено економічного обґрунтування впровадження запропонованої теоретичної моделі та вимірювальної системи. Бажано було б оцінити економічний ефект від впровадження розробленої системи та методики визначення параметрів в порівнянні з існуючими методами та засобами.

6. Бажано для кращого розкриття розділів роботи, окрім загальних висновків, наводити відповідні висновки до розділів.
7. У тексті дисертаційної роботи зустрічаються стилістичні та граматичні помилки

Всі наведені недоліки ніяк не впливають на позитивну оцінку дисертації. Зауваження можуть бути предметом подальших досліджень автора.

### **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.

### **Офіційний опонент:**

завідувач відділу теоретичної електротехніки  
та діагностики електротехнічного обладнання  
Інституту електродинаміки НАН України,  
доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник



Євген ЗАЙЦЕВ

02.06.2025р.

### **Підпис засвідчую**

Вчений секретар  
Інституту електродинаміки  
Національної академії наук України,  
к.т.н., с.досл.



Марина ГУТОРОВА