

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Іванчук Владислав Юрійович

УДК 621.311.243:621.383.51(043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ

Визначення параметрів фотоелектричних батарей в польових умовах

**за спеціальністю 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
в галузі знань 14 Електрична інженерія**

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ **В.Ю. Іванчук**

Науковий керівник:

Гаєвський Олександр Юлійович, доктор фізико-математичних наук, доцент

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Іванчук В.Ю. Визначення параметрів фотоелектричних батарей в польових умовах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, галузь знань 14 Електрична інженерія. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2025.

Дисертаційне дослідження присвячене вирішенню актуального наукового завдання, що полягає в оцінці стану промислових фотоелектричних модулів в умовах їх експлуатації шляхом встановлення моделі поведінки вольт-амперних характеристик, з урахуванням впливу фізичних процесів в напівпровідникових матеріалах при різних рівнях сонячної радіації та навантаження.

В роботі проведено літературно-патентний пошук за темою дисертаційного дослідження, виконано оцінку загального стану та світових тенденцій розвитку даної галузі. Розглянуто існуючі методи моделювання фотоелектричних елементів, визначено наявні аналітичні та метаевристичні підходи до екстракції їх параметрів. 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, недостатня відповідність моделей реальним експериментальним дослідженням. Досліджено прояви резистивних втрат та рекомбінацій носіїв на вольт-амперні характеристики промислових кремнієвих фотоелектричних модулів.

Розроблено та виготовлено на основі мікрокомп'ютера Raspberry Pi автоматизовану систему вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних модулів в польових умовах методом заряджання ємності разом з відповідним програмним забезпеченням. Виконано експериментальні

дослідження фотоелектричних модулів в польових умовах, в результаті яких отримано більше тисячі вимірів в змінних навколишніх умовах при різному рівні іррадіації від 50 до 900 Вт/м². Для обробки експериментальних даних розроблений комплексний адаптивний робастний алгоритм фільтрації, що дозволяє усунути вплив можливих радіаційних та температурних флуктуацій, притаманних вимірюванням в польових умовах навіть на інтервалах декілька секунд.

Отримано аналітичні залежності, які дозволяють при визначенні параметрів фотоелектричних модулів розділити вплив електричних втрат (послідовного опору) та рекомбінаційних процесів (фактору ідеальності та зворотного струму) на формування вольт-амперних характеристик, визначено оцінку для послідовного опору втрат.

Розроблено теоретичну модель для визначення параметрів фотоелектричних модулів при різних зовнішніх умовах сонячної радіації та температури. Визначено аналітичні залежності параметрів ФМ від напруги, а саме фактору ідеальності та зворотного струму насичення, які дозволяють аналізувати особливості процесів рекомбінації носіїв та електричних втрат. Показано, що в області прямої напруги нижче точки максимальної потужності коефіцієнт ідеальності може значно перевищувати 2, що пов'язано з рекомбінацією на мікроструктурних та поверхневих дефектах промислових фотоелектричних модулів, виготовлених за сучасними технологіями. В класичних моделях рекомбінації, які не враховують перелічені дефекти, цей коефіцієнт має бути в межах від 1 до 2.

Розроблено методику та програмне забезпечення, що дозволило вперше застосувати запропоновану однодіодну модель фотоелектричного елемента зі змінними параметрами та їхніми залежностями від напруги для опису вольт-амперних характеристик фотоелектричних модулів на відміну від загальноприйнятого використання двох- або трьохдіодних моделей з фіксованими параметрами. Останні засновані на суперпозиції діодних струмів і не відображають складного фізичного характеру формування струму в

фотоелектричних елементах. Відтворення вольт-амперних характеристик фотоелектричних модулів з використанням однодіодної схеми заміщення зі змінними параметрами демонструє значення нормалізованого середньоквадратичного відхилення від експериментальних даних порядку $nRMSE \sim 2 \cdot 10^{-3}$ і коефіцієнт кореляції R^2 в межах $0.99994 \div 0.99999$, що перевершує результати розрахунків в рамках однодіодної моделі з фіксованими параметрами фотоелектричних модулів.

Ключові слова: *відновлювані джерела енергії, фотоелектрична станція, фотоелектричний модуль, сонячний елемент, вольт-амперна характеристика, дефект, система вимірювання, модель, коефіцієнт ідеальності діода, опори електричних втрат, струм короткого замикання, рекомбінація в напівпровідниках.*

Наукові праці в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Результати дисертаційного дослідження висвітлені в 7 наукових працях, в тому числі в 5 статтях у періодичних наукових фахових виданнях України (на момент опублікування) за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, які проіндексовані у базах *Scopus*, а також 2 тез доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях.

1. О.Ю. Гаєвський, В.Ю. Іванчук, І.О. Корнієнко та В.В. Бодняк, «Алгоритм і програмне забезпечення для Arduino-системи тестування фотоелектричних модулів», *Відновлювана енергетика*, вип. 1 (64), с. 42-49, Бер 2021, doi: 10.36296/1819-8058.2021.1(64).42-49.

2. О.Ю. Гаєвський та В.Ю. Іванчук, «Автономна система вимірювання на основі мікрокомп'ютера для тестування фотоелектричних модулів», *Відновлювана енергетика*, вип. 3 (70), с. 54-61, Вер. 2022, doi: 10.36296/1819-8058.2022.3(70).54-61

3. О.Ю. Гаєвський, Г.М. Гаєвська та В.Ю. Іванчук, «Резервна фотоелектрична станція в умовах періодичних відключень споживачів від

електромережі», *Відновлювана енергетика*, вип. 1 (72), с. 27-36, Квіт 2023, doi: 10.36296/1819-8058.2023.1(72).27-36.

4. О.Ю. Гаєвський, В.Ю. Іванчук та Г.М. Гаєвська, «Аналіз взаємозалежностей параметрів фотоелектричних модулів та їх змінення при різних рівнях сонячної радіації», *Відновлювана енергетика*, вип. 3 (74), с. 59-65, Жов 2023, doi: 10.36296/1819-8058.2023.3(74).59-65.

5. О.Ю. Гаєвський та В.Ю. Іванчук, «Моделювання ВАХ фотоелектричного модуля зі змінними фактором ідеальності та зворотним струмом насичення», *Відновлювана енергетика*, вип. 3 (78), с. 54-61, Вер 2024, doi: 10.36296/1819-8058.2024.3(78).54-61.

6. A. Gaevskii and V. Ivanchuk, "Stand-alone system on Raspberry platform for measuring the parameters of photovoltaic modules in real conditions", *International scientific and technical journal "Modern problems of electric power engineering and automation"*, pp. 279-281, Jan 2024, available: jour.fea.kpi.ua/article/view/302496.

7. В.Ю. Іванчук та О.Ю. Гаєвський. «Вимірювання характеристик двосторонніх фотоелектричних модулів в різних режимах роботи», *Міжнародний науково-технічний журнал «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики»*, с. 294-296, Січ 2024, доступно: jour.fea.kpi.ua/article/view/302501.

SUMMARY

Ivanchuk V.Y. Determination of the parameters of photovoltaic modules in the field conditions. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in the specialty 141 Electric power, electrical engineering and electromechanics in the field of knowledge 14 Electrical engineering. National Technical University of Ukraine “Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2025.

The dissertation study is devoted to solving an urgent scientific task, which is to assess the condition of industrial photovoltaic modules in their operating conditions by establishing a model of the behavior of current-voltage characteristics, taking into account the influence of physical processes in semiconductor materials at different levels of solar radiation and load.

In this work, a literature and patent search was conducted on the topic of the dissertation research, an assessment of the general state and global trends in the development of this industry was performed. The existing methods of modeling photovoltaic cells are considered, the existing analytical and metaheuristic approaches to the extraction of their parameters are identified. The main disadvantages of modern modeling methods are analyzed, particularly their high computational requirements, the simplification of complex physical processes of current generation in photovoltaic cells into superpositional models, and, as a result, the insufficient correspondence of the models to real experimental investigations. The manifestations of resistive losses and carrier recombination effects on the current-voltage characteristics of industrial silicon photovoltaic modules are investigated.

An automated system for measuring the current-voltage characteristics of photovoltaic modules in field conditions was developed and manufactured based on a Raspberry Pi microcomputer, using the capacitance charging method, accompanied by corresponding software written in Python. Experimental studies of photovoltaic modules in field conditions were conducted, resulting in more than

thousand measurements under varying environmental conditions at solar radiation levels ranging from 50 to 900 W/m². For processing the experimental data, a comprehensive adaptive robust filtering algorithm has been developed that eliminates the influence of possible radiation and temperature fluctuations inherent in field measurements, even over intervals of only a few seconds.

Analytical dependencies have been obtained that allow separating the influence of electrical losses (series resistance) and recombination processes (ideality factor and reverse current) on the formation of current-voltage characteristics when determining module parameters. An estimation method for series resistance losses was also proposed.

A theoretical model has been developed to determine the parameters of photovoltaic modules under various external conditions of solar radiation and temperature. The analytical dependences of the photovoltaic module parameters on the voltage, namely the ideality factor and the reverse saturation current, are determined, which allow us to analyze the peculiarities of the carrier recombination processes and electrical losses. It is shown that in the forward voltage region below the maximum power point, the ideality factor can significantly exceed 2, which is associated with recombination at microstructural and surface defects of industrial photovoltaics manufactured using modern technologies. In classical recombination models that do not take into account these defects, the ideality factor is typically assumed to be between 1 and 2.

A methodology and software have been developed that allowed for the first time to apply the proposed single-diode model of photovoltaic cell with variable parameters and their voltage dependencies to describe the current-voltage characteristics of photovoltaic modules response, in contrast to the generally accepted use of two- or three-diode models with fixed parameters. The latter are based on the superposition of diode currents and do not reflect the complex physical nature of current generation in photovoltaic cells. The reproduction of the current-voltage characteristics of photovoltaic modules using a single-diode equivalent circuit with variable parameters demonstrates a normalized root mean square error from the

experimental data on the order $nRMSE \sim 2 \cdot 10^{-3}$ and a correlation coefficient R^2 ranging from 0.99994 to 0.99999, which surpasses the calculation results obtained using a single-diode model with fixed parameters.

Keywords: *renewable energy sources, photovoltaic power plant, photovoltaic module, solar cell, current–voltage characteristic, defect, measurement system, model, diode ideality factor, electrical loss resistances, short-circuit current, recombination in semiconductors.*

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

The results of the dissertation research are highlighted in 7 scientific papers, including 5 articles in periodicals of scientific professional editions of Ukraine (at the time of publication) in the specialty 141 Electric power, electrical engineering and electromechanics, which are indexed in *Scopus* databases, as well as 2 theses at international scientific and practical conferences.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	12
ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ЕЛЕМЕНТИ ТА ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	19
1.1 Типи фотоелектричних елементів.....	19
1.2 Основні процеси в ФЕ при освітленні.....	24
1.3 Основні характеристики ФМ.....	28
1.4 Моделювання ФЕ за допомогою еквівалентних схем заміщення.....	30
1.4.1 Однодіодна модель (1-D модель).....	30
1.4.2 Дводіодна модель (2-D модель)	33
1.4.3 Тридіодна модель (3-D модель).....	35
1.4.4 Інші моделі ФЕ	36
1.5 Методи визначення параметрів ФМ	38
1.5.1 Аналітичні методи.....	39
1.5.2 Метаевристичні методи.....	41
РОЗДІЛ 2. СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ВАХ ФМ ТА ЇЇ ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ПРИЗНАЧЕННЯ	43
2.1 Необхідність розробки системи вимірювання ВАХ ФМ	43
2.2 Огляд методів вимірювання ВАХ ФМ.....	44
2.3 Основні характеристики системи вимірювання ВАХ ФМ	47
2.4 Компоненти навантажувальної частини	50
2.4.1 Особливості роботи та визначення оптимальних параметрів конденсаторів	51
2.4.2 Розрахунок часу заряду конденсатора від ФМ.....	53
2.4.3 Вибір компонентів та визначення їх конфігурації.....	55
2.5 Організація вимірювальної складової	57

2.5.1 Аналого-цифровий перетворювач	57
2.5.2 Вимірювання струму ФМ	58
2.5.3 Вимірювання напруги ФМ	59
2.5.4 Додаткові вимірювання	60
2.6 Управління елементами системи вимірювання ВАХ ФМ	61
2.6.1 Силова частина керування навантаженням	62
2.6.2 Проектування та виготовлення плати управління	62
2.6.3 Мікрокомп'ютер	64
2.6.4 Алгоритм керування та програмне забезпечення	64
2.7 Інші особливості вимірювальної системи	67
2.7.1 Автономне живлення	67
2.7.2 Автоматичні та віддалені вимірювання	68
2.7.3 Інтерфейси передачі даних	69
2.7.4 Електричний захист та додаткове охолодження	69
2.8 Вимірювання ВАХ ФМ в польових умовах	70
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОМОДУЛІВ	75
3.1 Комплексний алгоритм фільтрації та апроксимації експериментальних даних ВАХ ФМ	75
3.1.1 Підготовка вхідних даних та видалення дублікатів	76
3.1.2 Медіанна фільтрація даних на основі критерію медіанного абсолютного відхилення залишків	76
3.1.3 Рівномірний розподіл вздовж довжини кривої	78
3.1.4 Адаптивне ковзне згладжування даних ВАХ ФМ на основі LOWESS	79
3.2 Рекомбінаційні струми в фотоелектричних перетворювачах	84
3.2.1 Рекомбінація Шоклі-Ріда-Холла	85
3.2.2 Рекомбінація в області просторового заряду	88
3.2.3 Поверхнева рекомбінація	89

3.3 Причини підвищених струмів рекомбінації в промислових ФМ	90
3.3.1 Крайова рекомбінація.....	90
3.3.2 Роль мікроструктурних дефектів	92
3.4 Розробка нового підходу до моделювання ФМ.....	95
3.4.1 Оцінки послідовного та паралельного опорів втрат.....	97
3.4.2 Розрахунок змінних параметрів ФМ	101
ВИСНОВКИ.....	112
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	115
ДОДАТКИ	132
Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації	132
Додаток Б. Зовнішній вигляд системи вимірювання.....	134
Додаток В. Електрична схема системи вимірювання	135
Додаток Г. Фрагмент програмного коду модуля <i>Prystriy_Ui.py</i> алгоритму управління	136
Додаток Д. Програмний код модуля <i>Prystriy_functions.py</i> алгоритму управління	140
Додаток Е. Програмний код функції підготовки та очистки даних <i>CLDATA</i>	151
Додаток Ж. Програмний код функції адаптивної медіанної фільтрації <i>DELOT</i>	153
Додаток З. Програмний код функції рівномірного розподілу <i>UDIST</i> ..	155
Додаток И. Програмний код функції адаптивного ковзного згладжування <i>DYNLOWESS</i>	156
Додаток К. Акти впровадження та використання наукових і практичних результатів	157

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

1. ФЕ – фотоелектричний елемент;
2. ФК – фотоелектрична комірка;
3. ФМ – фотоелектричний модуль;
4. ФЕС – фотоелектрична станція;
5. CIGS – мідно-індієво-галієві селеніди (copper indium gallium selenide);
6. PSC – перовскітні сонячні комірки (perovskite solar cells);
7. PERC – пасивований емітер і тильний контакт (passivated emitter and rear contact);
8. PERL – пасивований емітер і локально-дифузійний тильний контакт (passivated emitter and rear locally-diffused);
9. PERT – пасивований емітер і повністю дифузійний тильний контакт (passivated emitter and rear totally diffused)
10. ККД – коефіцієнт корисної дії;
11. ВАХ – вольт-амперна характеристика;
12. КЗ – струм короткого замикання I_{sc} ;
13. ХХ – напруга холостого ходу V_{oc} ;
14. SRH – модель Шоклі-Ріда-Холла (Shockley-Read-Hall)
15. STC – стандартні умови тестування (standard testing conditions);
16. МРР – точка максимуму потужності (maximum power point);
17. FF – коефіцієнт заповнення (fill factor);
18. ПК – персональний комп'ютер;
19. ПЗ – програмне забезпечення;
20. АЦП – аналогово-цифровий перетворювач.

ВСТУП

Актуальність теми. На ринку енергії від нетрадиційних та відновлюваних джерел найбільш стрімко зростає за останнє десятиліття частина сонячної електричної енергії, яка генерується фотоелектричними станціями різного масштабу. Фотоелектричні системи являють собою найбільш прямий спосіб перетворення сонячної енергії в електричну, завдяки використанню властивостей напівпровідникових матеріалів.

Через високі інвестиційні витрати та забезпечення оптимізованого використання сонячної енергії перед встановленням фотоелектричної системи необхідна ретельна оцінка ефективності генеруючих компонентів станцій – фотоелектричних модулів (ФМ). Оскільки початкова вартість системи є досить високою, точне та надійне моделювання фотоелектричних систем перед встановленням є актуальною задачею. Також значна кількість ФМ знаходиться довгий час в експлуатації і потребує оцінки їх стану в польових умовах, тому важливими задачами є визначення основних параметрів ФМ, а також з'ясування їх змін в різних зовнішніх умовах, на яких може ґрунтуватися діагностика ФМ.

В свою чергу, класичні підходи до моделювання фотоелектричних модулів не враховують всіх аспектів зниження ефективності за рахунок резистивних втрат, процесів рекомбінації на різного типу дефектах та багаторівневих пастках, притаманних промисловим ФМ, виготовленим за сучасними технологіями.

Визначення поточного стану та характеристик ФМ, що працюють в складі фотоелектричних станцій, неможливе без достатньо точного вимірювального засобу, що дозволяє проводити експериментальні дослідження ФМ в реальних умовах експлуатації. Такі засоби мають бути оперативними, компактними, побудованими на базі мікрокомп'ютера, з можливістю обробки в реальному часі даних вимірювання.

Мета дослідження. Метою роботи є забезпечення належної оцінки стану фотоелектричних модулів в реальних умовах їх роботи шляхом створення теоретичної моделі аналізу вольт-амперних характеристик з урахуванням фізичних процесів в напівпровідникових матеріалах при різних рівнях навантаження та сонячної радіації.

Поставлена мета вимагає розв'язання наступних завдань дослідження:

- аналіз наукової літератури, присвяченої процесам формування струмів та рекомбінації носіїв заряду в фотоелектричних елементах (ФЕ), порівняльний аналіз технологій виготовлення ФМ та визначення основних фізичних процесів, що знижують ефективність роботи ФМ;
- розробка вимірювальної системи для зняття вольт-амперних характеристик (ВАХ) ФМ в польових умовах та розрахунку їх параметрів;
- розробка адаптивного робастного алгоритму обробки експериментальних даних;
- отримання оціночних аналітичних співвідношень, які характеризують електричні втрати та процеси рекомбінації в ФМ;
- розробка теоретичної моделі впливу процесів рекомбінації та резистивних втрат на параметри промислових ФМ, що змінюються з напругою в значних межах;
- розробка методики та програмного забезпечення для визначення змінних параметрів ФМ на основі експериментальних ВАХ.

Об'єкт дослідження – резистивні втрати та рекомбінаційні процеси, які обмежують ефективність роботи промислових фотоелектричних модулів в реальних умовах експлуатації.

Предмет дослідження – змінні параметри фотоелектричних модулів при різних рівнях навантаження і сонячної радіації та основні фактори впливу на формування струмів у фотоелектричних модулях.

Методи дослідження. Вирішення поставлених у роботі задач здійснювалося з використанням теоретичних основ електротехнічних систем на постійному струмі, фізичної теорії напівпровідникових матеріалів та *pn*-переходів в фотоелектричних елементах, математичних методів оптимізації та апроксимації, методів статистичної робастної обробки експериментальних даних.

Наукова новизна отриманих результатів:

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. Отримані аналітичні залежності, які дозволяють при визначенні параметрів ФМ розділити вклади електричних втрат та рекомбінаційних процесів у формування ВАХ.
3. 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:

1. Розроблено автономну автоматизовану вимірювальну систему, що дозволяє отримувати в польових умовах якісні ВАХ ФМ 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 ВАХ ФМ, що враховує особливості роботи ФМ у поточних змінних зовнішніх умовах та дозволяє забезпечити необхідну точність для подальших розрахунків та аналізу;

3. Розроблено методику визначення змінних параметрів ФМ на основі експериментальних ВАХ, що базується на отриманих аналітичних залежностях та запропонованій моделі.

Наукові та практичні результати дисертаційної роботи передано для використання у навчальному процесі та наукових дослідженнях кафедри відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та до Інституту відновлюваної енергетики НАН України.

Особистий внесок здобувача. Усі результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно у процесі науково-дослідницької роботи. Безпосередньо дисертантом було:

- виконано порівняльний аналіз різних типів фотоелектричних комірок, визначено основні процеси в фотоелектричних елементах під час освітлення та основні характеристики фотоелектричних модулів;
- за результатами літературно-патентного пошуку за темою дисертаційного дослідження виконано порівняльний аналіз існуючих методів моделювання фотоелектричних елементів за допомогою еквівалентних схем заміщення;
- визначено наявні аналітичні та метаевристичні підходи до екстракції параметрів фотоелектричних модулів;
- обґрунтовано необхідність розробки системи вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних модулів в польових умовах, розглянуто особливості процесу тестування фотоелектричних модулів;
- обрано оптимальну конфігурацію навантажувальної частини, спроектовано та виготовлено основні складові вимірювальної системи, розроблено необхідне програмне забезпечення;
- проведено експериментальні дослідження фотоелектричних модулів в польових умовах, здійснено обробку отриманих даних та їх аналіз;

- розроблено комплексний адаптивний робастний алгоритм фільтрації та апроксимації експериментальних вольт-амперних характеристик фотоелектричних модулів задля забезпечення необхідної якості даних;
- розглянуто основні фізичні процеси, що є причиною зниження ефективності роботи фотоелектричних модулів;
- розроблено теоретичну модель для визначення параметрів фотоелектричних модулів, що мають змінний характер в широкому діапазоні напруги;
- розроблено методику та програмне забезпечення для екстракції змінних параметрів фотоелектричних модулів на основі експериментальних вольт-амперних характеристик
- здійснено порівняльний аналіз запропонованої моделі фотоелектричних модулів за допомогою статистичних показників на основі отриманих експериментальних вимірів.

Співавторами наукових праць по темі дисертації є науковий керівник та інші науковці, що брали участь в дослідженнях, а саме Гаєвський О.Ю., Корнієнко І.О., Гаєвська Г.М., Бодняк В.В.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить фактичний матеріал і основний творчий доробок.

Постановку мети та завдань виконано разом з науковим керівником. Наукові та практичні результати, які висвітлено у дисертаційній роботі, отримано здобувачем особисто під керівництвом професора кафедри відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доктора фізико-математичних наук Гаєвського Олександра Юлійовича.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. 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.

Апробація результатів дисертації. Положення та результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених, аспірантів та студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики» в м. Київ, 2024 р.

Публікації. Основні результати дисертації відображені в 7 наукових працях, в тому числі в 5 статтях у періодичних наукових фахових виданнях України (на момент опублікування) за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, які проіндексовані у базах *Scopus*, а також 2 тез доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях із публікацією результатів доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 159 сторінках машинописного тексту, складається із анотації, вступу, 3 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 10 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 102 сторінки друкованого тексту. Робота ілюстрована 47 рисунками та 5 таблицями. Список використаних джерел містить 162 найменування.

РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ЕЛЕМЕНТИ ТА ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Типи фотоелектричних елементів

Фотоелектричними елементами (ФЕ) будемо називати як модулі, так і фотоелектричні комірки (ФК), з яких вони складаються.

Напівпровідникові матеріали ФЕ

Еволюція ФЕ нерозривно пов'язана з удосконаленням матеріалів з яких вони виготовлені. Початковий етап розвитку ФЕ характеризувався використанням кристалічного кремнію – матеріалу, який зберіг свою популярність завдяки доведеній ефективності та довговічності [1, 2, 3]. Напівпровідникові властивості кремнію, який використовується в різних морфологічних станах (монокристалічному, полікристалічному або аморфному) роблять його ідеальним матеріалом для перетворення сонячного випромінювання: його ширина забороненої зони добре підходить для поглинання широкого діапазону сонячного спектру, забезпечуючи високу ефективність перетворення енергії [4].

Одними з найефективніших є ФЕ з арсеніду галію ($GaAs$), який на відміну від кремнію, є прямозонним напівпровідником. Однозонний ФЕ $GaAs$ може досягти максимальної теоретичної ефективності 33,5% при неконцентрованому сонячному світлі [5]. Унікальні властивості $GaAs$ (природна стійкість до нагрівання, вологості, радіації та ультрафіолетового світла) роблять ФЕ на його основі особливо придатними для космічних застосувань [6]. Ефективність перетворення енергії гетероструктурами зі сполук III-V стабільно зростає і наближається до 40% у елементів лабораторного масштабу [7, 8]. Взагалі ФЕ, виготовлені з напівпровідникових сполук III-V і II-VI, окрім провідної ефективності перетворення енергії, мають такі переваги, як можливість регулювання забороненої зони елементним складом, високе поглинання фотонів завдяки їх прямозонності, вищий питомий опір високоенергетичним променям у космосі. Тонкоплівкові ФЕ з телуриду кадмію ($CdTe$) забезпечують зменшення витрати матеріалів і зниження витрат на виробництво [9].

В категорії тонкоплівкових ФЕ виділяються гарними фотоелектричними властивостями та потенціалом до високої ефективності мідно-індієво-галієві селеніди (*Copper Indium Gallium Selenide, CIGS*) [10]. ФЕ на основі *CIGS* характеризується значним коефіцієнтом поглинання та прямозонною структурою. Енергію прямих переходів у зону провідності *CIGS* можна регулювати в межах від 1,0 до 1,7 еВ, що дозволяє забезпечити оптимальне поглинання у різних інтервалах сонячного спектру. Ця можливість у поєднанні з високою якістю матеріалу, зі здатністю його до нанесення на гнучких підкладках позиціонує *CIGS* як універсальне рішення для широкого кола практичних застосувань.

Перспективною фотоелектричною технологією стали перовскітові сонячні комірки (*Perovskite solar cells, PSC*), насамперед завдяки їхнім високим оптоелектронним властивостям і простоті виготовлення [11]. Перовскітові ФЕ мають *p-i-n*-перехід та розділяються на мезопористі та регулярні структури. Після більш ніж десяти років розробки *PSC* була досягнута ефективність перетворення електроенергії 25,7% [12]. Однак однією з основних проблем *PSC* є суттєва втрата ефективності з часом. На досягнення стабільності функціонування перовскітних ФЕ спрямовані основні зусилля дослідників і певні результати в цьому напрямку отримані на тонкоплівкових конструкціях [13].

Структура та технології сучасних ФЕ

Для роботи фотоелектричного елемента необхідні як мінімум три елементи конструкції:

- Поглинач випромінювання, який спрямовує енергію фотонів на збудження носіїв заряду. В якості поглинача, як правило, використовується напівпровідник, який в процесі поглинання генерує електронно-діркові пари: електрони у зоні провідності та дірки у валентній зоні.

- Мембрана (наприклад *pn*-перехід) для запобігання зворотному процесу – рекомбінації носіїв, при якому збуджені носії переходять в основний стан.
- Контакти, які дозволяють збирати носії та підключатися до інших ФЕ.

Цих елементів достатньо для роботи ФЕ з невеликою ефективністю перетворення енергії випромінювання в електричну енергію, але для підвищення ефективності доводиться створювати сонячні комірки та ФМ з набагато більш складною структурою. Розглянемо основні структури та технології сучасних ФЕ.

Більшість комерційних ФМ виробляються на основі моно- або мультикристалічного кремнію *p*-типу, і демонструють більшу ефективність, ніж ФМ з базою *n*-типу. Зменшення товщини кремнієвих пластин, яке сприяє зменшенню вартості ФМ, обмежується зростанням швидкості рекомбінації на задній поверхні пластини. Поширеним методом обмеження такого типу рекомбінації є застосування легування алюмінієм до максимальної концентрації (приблизно $3\cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) задньої поверхні пластини та нанесення спеченої алюмінієвої пасти зі значною дифузією в кремній. В результаті утворюється шар зі зворотнім електричним полем, яке відштовхує фотогенеровані неосновні носії та зменшує швидкість рекомбінації на тильній поверхні. Наразі така структура з умовною назвою Aluminum Back Surface Field (*Al-BSF*) є домінуючою для моно- та мультикристалічних кремнієвих ФЕ (рис. 1.1).

З метою подальшого підвищення ККД ($> 20\%$) практично всі ФЕ мають у своїй структурі на поверхні напівпровідників шари діелектрика (SiO_2 , SiNx або Al_2O_3) для пасивації поверхні [16]. Особливо велике значення має пасивація тильної сторони: майже повна задня поверхня покрита шаром діелектрика, а контакти мають гостроподібну або лінійну форму. На структурі, в якій пасивована також фронтальна поверхня, заснована технологія *PERC* (*passivated emitter and rear contact* – пасивований емітер і тильний контакт, рис. 1.2 а), що

була розроблена більш 30 років тому [17]. ККД такої структури у пізніших роботах перевищував 23%.

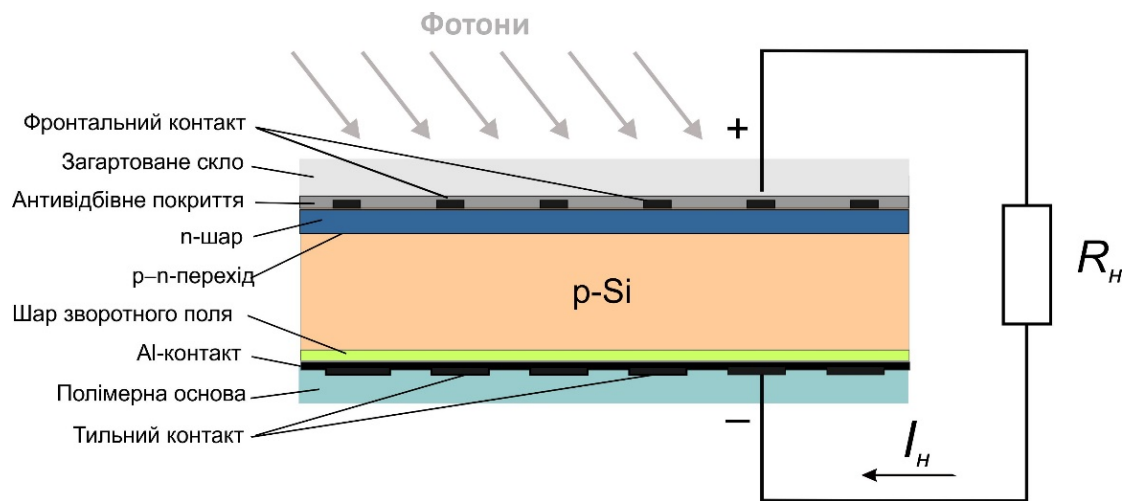


Рисунок 1.1 Конструкція *Al-BSF* ФЕК *p*-типу, до якої підключено електричне навантаження [14, 15]

Ефективність PERC елементів обмежена тим фактом, що задні контактні зони з алюмінієм безпосередньо контактують з кремнієм, що призводить до високої швидкості рекомбінації в цих областях.

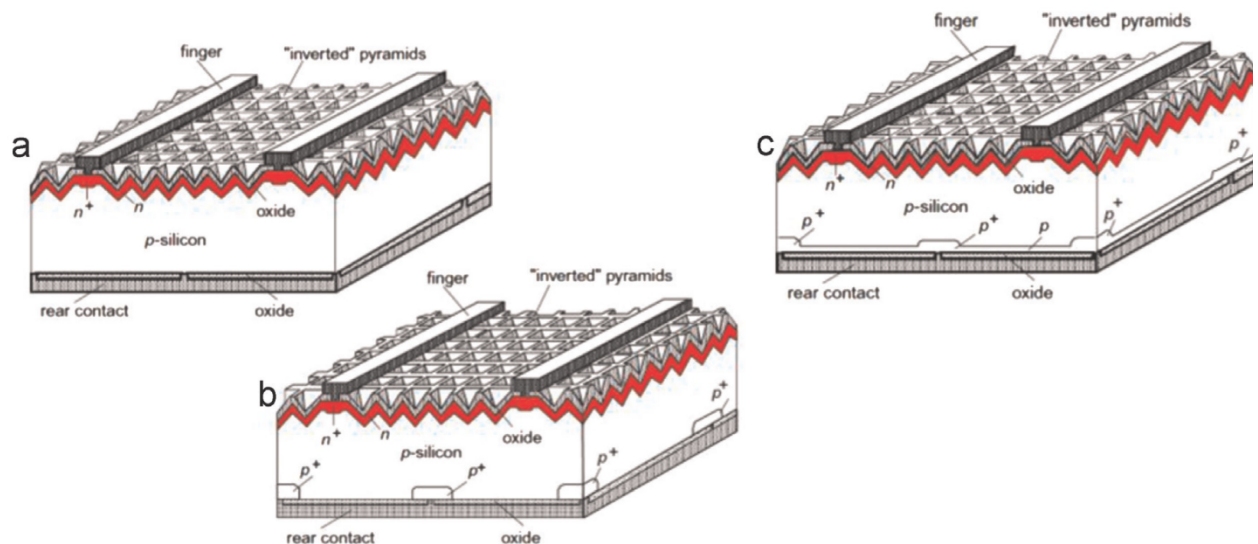


Рисунок 1.2 Сімейство пасивованих емітерів і тильних контактів:
а – *PERC*; б – *PERL*; в – *PERT* [18]

Інтенсивність рекомбінації можна зменшити, якщо під металевим контактом створити дифузний p^+ шар, який слугує пасивації контактної поверхні. Саме така більш досконала структура ФЕ з пасивацією поверхні була

розроблена в 1990 р. та мала назву *PERL* (*passivated emitter and rear locally-diffused*) – пасивований емітер і локально-дифузійний тильний контакт, рис. 1.2 б) [19, 20]. Одна з головних переваг комірок *PERL* перед звичайними кремнієвими комірки — це покращена пасивація всієї поверхні термічно отриманим оксидом в атмосфері трихлоретану (*TCA*). Результатом цього є суттєве зменшення щільності струму насичення емітера і відповідно більша напруга холостого ходу. Наряду з цим оксид спричиняє приблизно тільки 3% втрат на відбиття випромінювання на передній поверхні елемента. Крім пасивації оксидом *TCA*, передня та задня контактні зони пасивуються дифузією фосфору та бору високої концентрації, відповідно. Отже, рекомбінація в цих контактних зонах значно зменшена через придушення неосновних носіїв в областях p^+ .

Слід відмітити, що через малу площу дифузних контактів (див. рис. 1.2 б) елементи за технологією *PERL* мають відносно великий питомий опір, що призводить до невисокого коефіцієнта заповнення V_{AX} . Для подолання цього недоліка була запропонована структура *PERT* (*passivated emitter and rear totally diffused*) – пасивований емітер і повністю дифузійний тильний контакт, рис. 1.2 с) [21]. В структуру *PERT* уздовж усієї задньої поверхні додано тонкий шар бору, тоді як усі інші елементи, притаманні елементам *PERL*, залишаються. Шар p -типу нанесений вздовж задньої поверхні і забезпечує низький рівень опору, завдяки цьому суцільному шару генеровані світлом носії рухаються перпендикулярно до нього. При створенні заднього p -шару потрібно прагнути компромісу між підвищеною провідністю та низьким рівнем рекомбінації поблизу задньої поверхні. Отже, при створенні p -шару витримується малий рівень легування бором. Відповідно роботі [22] структури *PERT*, які використовують субстрати, вирощені за методом Чохральського в аксіальному магнітному полі, мають покращені фактор заповнення та напругу V_{XX} .

Взагалі у порівнянні з традиційною технологією ФЕ, технології виготовлення *PERC*, *PERL* і *PERT* дозволяють суттєво підвищити ККД сонячних комірок [23].

В останні роки односторонні фотоелектричні технології частково витісняються двосторонніми фотоелементами, модулями та системами. Додатковий збір сонячного випромінювання здійснюється в них на задній поверхні замість непрозорих монолітних контактів встановлені контакти, ізолювані та обмежені за площею. Ефективність задньої сторони досягає більше 60% ефективності передньої сторони. Базуються двосторонні конструкції на *PERC*, *PERT*, *HIT* технологіях [24].

1.2 Основні процеси в ФЕ при освітленні

Конструкцію ФЕ можна спрощено зобразити як показано на рис. 1.1. Основними елементами є пластинчасті напівпровідники різного типу, між якими утворюється область *pn*-переходу. На лицьову освітлену поверхню ФЕ (у цьому прикладі *n*-область) нанесена контактна металева сітка, тильна поверхня (*p*-область) має суцільний контакт, а до контактів підключено електричне навантаження [15].

З двох сторін від границі *pn*-переходу виникає область просторового заряду (область, що виснажена основними носіями, *depletion region*) з відповідним електричним полем. При освітленні поверхні ФЕ відбувається збудження електронів у зоні провідності під дією квантів випромінювання з енергією, достатньою для подолання забороненої зони. Цей процес представляється як фотогенерація електронно-діркових пар.

Фотоелектрони, які утворюються поблизу *pn*-переходу, захоплюються електричним полем просторового заряду та потрапляють в *n*-напівпровідник, де вони є основними, а дірки – в *p*-напівпровідник. Якщо електроди ФЕ під'єднані до навантаження, електрони рухаються по електричному ланцюгу, утворюючи струм прямого напрямку: електрони стікають через негативний електрод *n*-напівпровідника, а дірки – через позитивний електрод *p*-напівпровідника. Величина цього струму залежить від інтенсивності процесу фотогенерації та опору навантаження.

Ключову роль у розділенні носіїв заряду та протіканні струму у прямому напрямку грає *pn*-перехід. Останні можна класифікувати за типом матеріалів, які використовуються:

Гомоперехід. Утворюється між двома шарами одного й того ж напівпровідника (наприклад, *c-Si*), енергетичний бар'єр створюється виключно за рахунок домішок.

Гетероперехід. Виникає при контакті різних напівпровідникових матеріалів. Такі переходи створюють більший внутрішній електричний потенціал, що може підвищувати ефективність пристроїв.

p-i-n перехід. Включає внутрішній шар (*intrinsic*) власного напівпровідника, який розширює область внутрішнього електричного поля, що зменшує ймовірність рекомбінації носіїв.

Метал-напівпровідниковий перехід (m-s). Формується між металом і напівпровідником; прикладом є бар'єр Шотткі, який створює внутрішнє електричне поле та реалізація його у діодах Шотткі.

Прикладення електричного поля призводить до появи дрейфового струму, і результуючий струм стає рівним сумі дифузійного та дрейфового струмів [25, 26]. Повна щільність струму складається з електронної i_n та діркової i_p компонент струму через *pn*-перехід:

$$i = i_n + i_p = kTn_i^2 \left(\frac{\mu_n}{L_n N_A} + \frac{\mu_p}{L_p N_D} \right) \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (1.1)$$

де k – стала Больцмана (1.38×10^{-23} Дж/К), T – абсолютна температура в Кельвінах, n_i – власна концентрація носіїв заряду в напівпровіднику, μ_n та μ_p – рухливість електронів та дірок, L_n та L_p – довжина дифузії електронів та дірок, N_A та N_D – концентрація акцепторів та донорів, q – заряд електрона (1.6×10^{-19} Кл), U – прикладена напруга.

Формула (1.1) справедлива також при від'ємних значеннях напруги (при зворотній напрузі). В цьому випадку експоненційним членом можна знехтувати та отримати вираз для зворотного струму насичення:

$$i_0^{diff} = kTn_i^2 \left(\frac{\mu_n}{L_n N_A} + \frac{\mu_p}{L_p N_D} \right). \quad (1.2)$$

Цей струм є чисто дифузійним, оскільки не залежить від електричного поля, тоді при прямому зміщенні ($v > 0$) отримаємо відому формулу Шоклі [27]:

$$i = i_0^{diff} \left[\exp\left(\frac{qv}{kT}\right) - 1 \right], \quad (1.3)$$

де v – напруга на діоді, q – заряд електрона, $k \cdot T$ – теплова енергія, а $kT/q = v_T$ – теплова напруга (25.69 мВ при 25 °C), i – щільність струму.

Якщо врахувати, що в діапазоні робочої напруги експонента набагато більше 1, то отримаємо лінійну залежність логарифму струму від прикладеної напруги:

$$\ln i = \ln i_0^{diff} + \frac{qv}{kT} \quad (1.4)$$

Поведінка реального pn -переходу не може бути описана ідеальною моделлю (1.1) – (1.4), оскільки необхідно враховувати процеси рекомбінації, які відбуваються в різних ділянках напівпровідникової структури (більш детальний огляд механізмів рекомбінації наведений у розд. 3.2). При врахуванні тільки однорівневої рекомбінації в області просторового заряду згідно моделі Шоклі-Ріда-Холла (SRH – Shockley-Read-Hall) [28, 29], можна прийти до формули виду (1.3), але з поправкою на неідеальність pn -переходу у вигляді коефіцієнта ідеальності A у показнику експоненти:

$$i = i_0^{diff} \left[\exp\left(\frac{q \cdot v}{A \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right], \quad (1.5)$$

де A – коефіцієнт ідеальності, який змінюється на різних інтервалах напруги. В рамках моделі SRH діапазон значень A від 1 (ідеальний pn -перехід) до 2.

Експериментальні дані для струму через pn -перехід, який виготовлений на високому технологічному рівні, дають залежності від напруги типу, показаному на рис. 1.3.

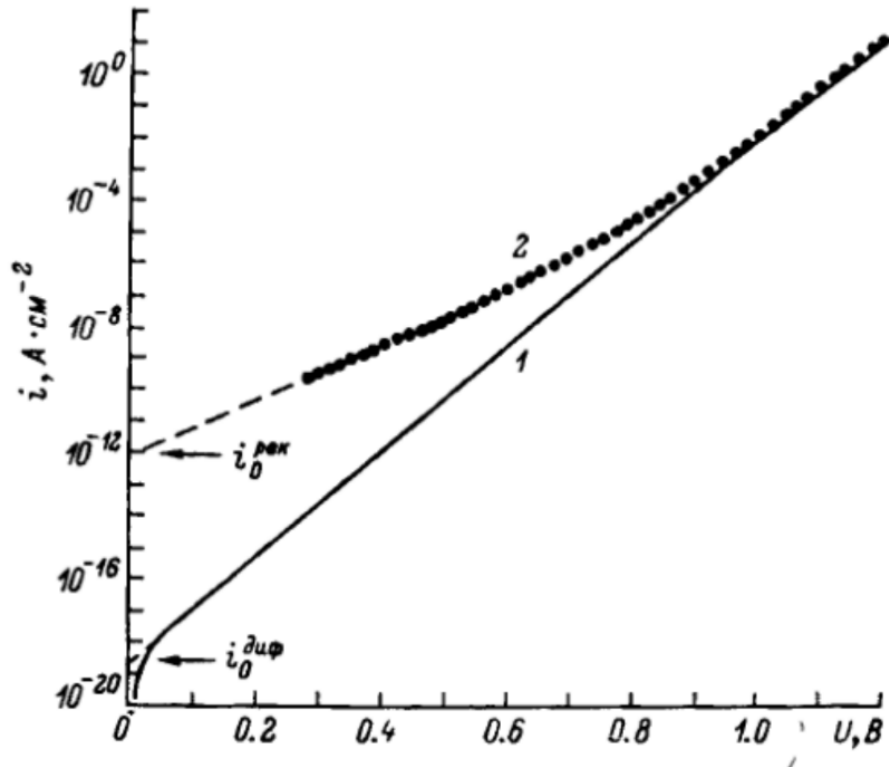


Рисунок 1.3 Залежність струму через pn -перехід від напруги

При освітленні pn -переході, тобто при перетворенні діоду в ФЕ, розглянута ВАХ описує електричний струм через діод у прямому напрямку у відсутності освітлення (темнова ВАХ).

Традиційна теорія ФЕ передбачає електрично однорідну комірку, в якій щільність струму через pn -перехід описується рівнянням Шоклі (1.5), а струм через навантаження дається виразом:

$$i(v) = i_{ph} - i_0 \left[\exp\left(\frac{q \cdot v}{A \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] = i_{ph} - i_0 \left[\exp\left(\frac{v}{A \cdot v_T}\right) - 1 \right], \quad (1.6)$$

де i_{ph} – щільність фотоструму, який генерується ФЕ в поточних зовнішніх умовах, $v_T = \frac{kT}{q}$ – «теплова» напруга.

При короткому замиканні контактів ФЕ $v = 0$ і фотострум згідно з (1.6) дорівнює струму короткого замикання: $i_{ph} = i_{sc}$ під час освітлення. Він не залежить від зміщення v , тоді як другий член у рівнянні (1.6) являє собою залежну від напруги щільність темнового струму. Відповідно до рівняння (1.6) освітлена характеристика ФЕ дорівнює фотоструму, зміщеному в негативному

напрямку на темновий струм. Для режиму ХХ $v = v_{oc}$, $i = 0$ (в розімкнутому ланцюзі фотострум повністю врівноважений темновим струмом) можна отримати відомий вираз для напруги холостого ходу:

$$v_{oc} = A \cdot v_T \cdot \ln \frac{i_{sc}}{i_0} \quad (1.7)$$

Цей вираз показує вплив темнотної характеристики, а точніше, параметрів i_0 , A на ефективність ФЕ. Напруга в точці максимальної потужності v_{mpp} і відповідна потужність будуть тим більше, чим більше v_{oc} . Згідно з формулою (1.7) це означає, що чим менше значення i_0 , тим більше ефективність ФЕ.

З цього виразу можна зробити також висновок про форму кривої в області MPP: збільшення v_{oc} призводить до зміщення MPP вправо на ВАХ (рис. 1.5). Дійсно, величина змінення v_{oc} і v_{mpp} залежить від двох конкуруючих множників в добутку $A \cdot \ln^{-1} i_0$. Оскільки поблизу v_{oc} криві повного та дифузійного струмів практично співпадають (рис. 1.3), величина вказаного добутку визначається в основному множником A , і зростання рекомбінаційного вкладу в струм буде зміщати MPP в сторону більших v .

1.3 Основні характеристики ФМ

Впровадження нових технологій у виробництво фотоелектричних модулів потребують розробки відповідних схем контролю та розширених режимів тестування. Найбільш інформативними з точки зору оцінювання ефективності роботи ФМ на навантаження вважаються $I(V)$ та $P(V)$ характеристики. Ці характеристики, отримані у стандартних тестових умовах (STC – Standard Test Conditions, 1000 W/m², 25 °C, AM1.5) можна розглядати як сертифікат якості ФМ. В той же час ВАХ, які виміряні у звичайних (польових) умовах експлуатації, є корисним експериментальним матеріалом при проектуванні фотоелектричних систем з високим виробітком електроенергії.

На рис. 1.5 показані типові характерні криві залежності струму $I(V)$ та потужності $P(V)$ від напруги на навантаженні. На графіках зображені сімейства кривих, які звичайно отримуються при різних значеннях температури та

сонячної радіації. Основними точками, між якими будуються ці криві, є струм КЗ I_{sc} або максимальний струм при нульовій напрузі та напруга ХХ V_{oc} або максимальна напруга при нульовому струмі (рис. 1.5 а). Для кожної точки на кривій $I(V)$ добуток струму та напруги представляє результуючу потужність у навантаженні. Максимальна потужність, створена модулем, досягається в точці MPP, де добуток струму та напруги є максимальним (рис. 1.4) [15].

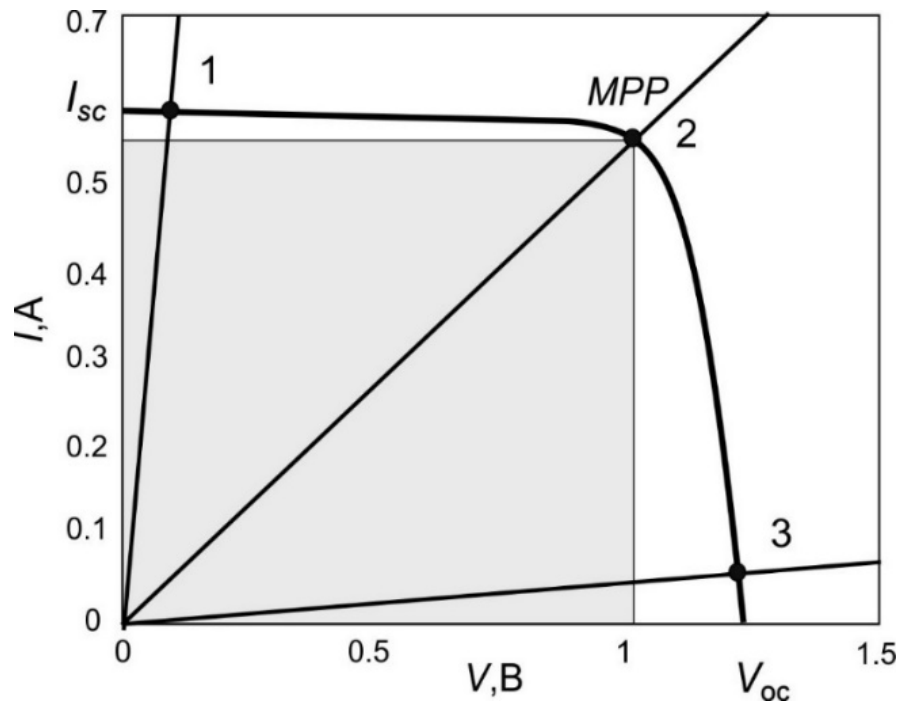


Рисунок 1.4 Навантажувальна ВАХ фотоелектричного елемента й омичні характеристики навантаження (прямі лінії для різних опорів).

Точка 2 відповідає максимуму потужності,
площа зафарбованого прямокутника – максимальній потужності

Показником ефективності ФМ є також коефіцієнт заповнення (FF – Fill Factor), що визначається як співвідношення:

$$FF = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} < 1 \quad (1.8)$$

яке показує наскільки ВАХ наближається до прямокутного вигляду. Очевидно, що чим ближче до одиниці коефіцієнт заповнення, тим краще якість ФМ.

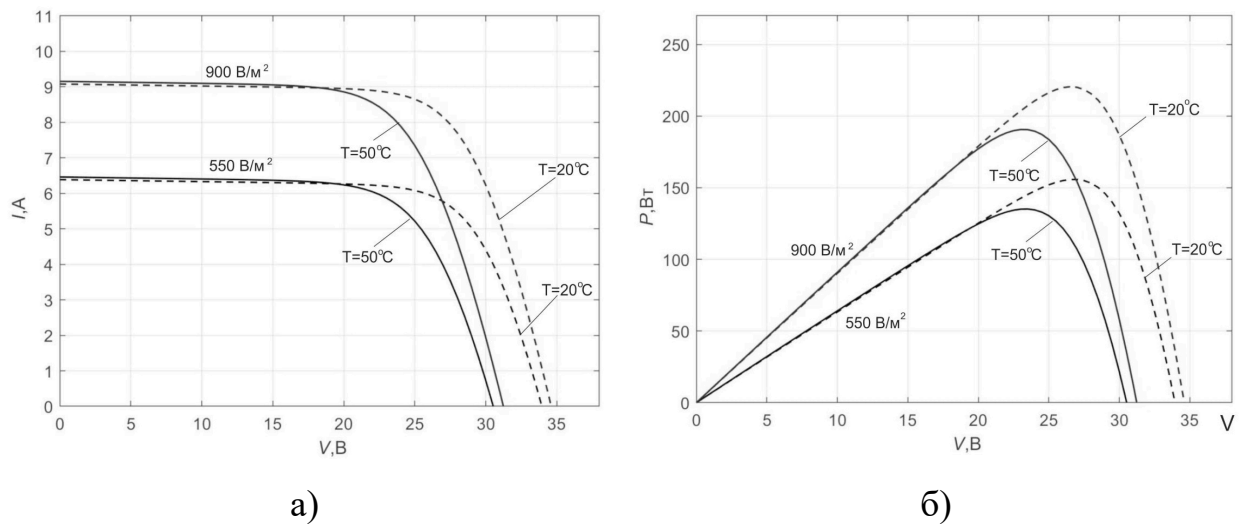


Рисунок 1.5 Сімейства характеристик $I(V)$, $P(V)$ ФМ для різних температур та інтенсивності радіації: ВАХ (а); криві потужності (б) (модельні розрахунки для Si-модулів потужністю 250 Вт)

Перелічені характеристики свідчать про поточний стан фотоелектричних модулів або комірок, з яких вони складаються, та можуть вказувати про падіння їх ефективності та пошкодження.

1.4 Моделювання ФЕ за допомогою еквівалентних схем заміщення

Моделювання роботи масивів ФМ у різних зовнішніх умовах є важливим етапом при проектуванні, аналізі та прогнозуванні роботи фотоелектричних станцій. Найпоширенішим підходом до моделювання є використання еквівалентних схем заміщення, які дозволяють враховувати ключові фізичні процеси, що відбуваються в сонячних елементах.

1.4.1 Однодіодна модель (1-D модель)

Рівняння типу (1.6) для струму освітленої ФК можна розглядати як рівняння Кірхгофа для електричної схеми з трьома елементами: джерелом струму i_{ph} , діодом з нелінійною ВАХ і навантаженням зі струмом $i(V)$. Але рівняння (1.6) є лише ідеальною моделлю фотоелектричного елемента. Насправді потрібно враховувати електричні втрати, які описуються послідовним r_s і паралельним r_p опорами. Враховуючи всі потрібні елементи, які визначають ВАХ, приходимо до однодіодної (1-D) схеми заміщення,

показаної на рисунку 1.6. 1-D модель є, мабуть, найпоширенішою еквівалентною електричною схемою реального ФЕ. Багато досліджень були зосереджені на вилученні параметрів моделі з вимірювань, проведених в STC, з метою відтворення експериментальних характеристик $I(V)$. Умовами STC вважаються інтенсивність нормальної падаючої радіації 1000 Вт/м^2 при спектрі AM1.5G і температурі ФЕ $T = 25^\circ \text{C}$.

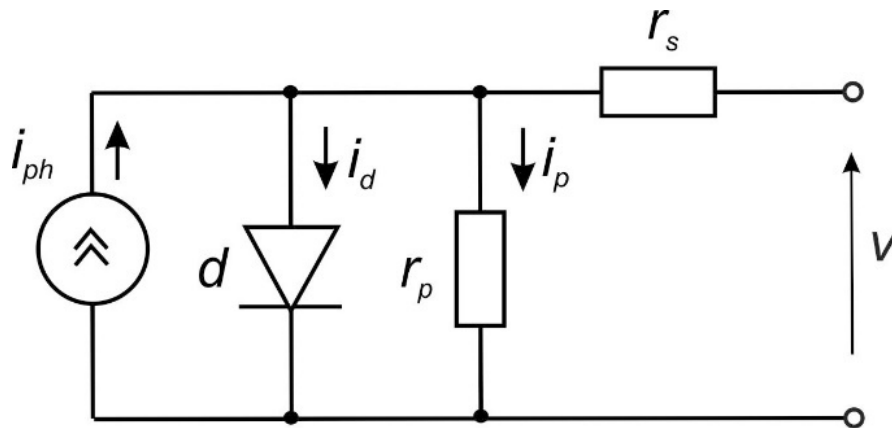


Рисунок 1.6 Однодіодна схема заміщення ФМ

Джерело i_{ph} моделює струм, утворений за рахунок фотогенерації (фотострум) і пропорційний інтенсивності G_n сонячного випромінювання, нормально падаючого на приймальну поверхню елемента. Величину i_{ph} можна оцінювати відношенням:

$$i_{ph} = \frac{G_n}{1000} \cdot i_{ph}^{STC}, \quad (1.9)$$

де i_{ph}^{STC} — фотострум при стандартних тестових умовах.

Діод в схемі описується ВАХ за формулою Шоклі (1.5) з коефіцієнтом ідеальності A .

Послідовний опір r_s враховує омичні втрати, які виникають в основному через опір матеріалів та контактів у структурі сонячного елемента. Його вплив на падіння напруги навантаження виражається як

$$v = v_d - i \cdot r_s, \quad (1.10)$$

де v_d — напруга на діоді.

Шунтуючий опір r_p моделює витік струму через бокові поверхні ФЕ, дефекти, такі як мікротріщини, та інше. Струм i_p через опір r_p дорівнює:

$$i_p = \frac{v + i \cdot r_s}{r_p} \quad (1.11)$$

Загальне рівняння одnodіодної моделі заміщення ФМ має вигляд:

$$i(v) = i_{ph} - i_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{v + i \cdot r_s}{A \cdot V_T}\right) - 1 \right] - \frac{v + i \cdot r_s}{r_p} \quad (1.12)$$

ВАХ ФЕ залежить складним чином від природи матеріалів та їх електрооптичної властивості, від структури елемента та технологічних параметрів. Оскільки крива $I(V)$ має нелінійний характер, а одnodіодна модель залежить від кількох параметрів, математичне моделювання ВАХ є зовсім не тривіальною задачею. Одnodіодна модель містить 5 параметрів (п'ятипараметрична модель). Ці параметри, як правило, оцінюються на основі ВАХ, виміряної в умовах STC, або дуже наближено – на основі інформації, включеної у технічний паспорт. Але для практичного застосування необхідні параметри, що виміряні в різних умовах сонячного опромінення і температури навколишнього середовища, оскільки фотоелектричні модулі зазвичай не працюють в STC. Загальний підхід базується на розширенні рівняння (1.6) додатковими елементами в схемі заміщення. З часом були прикладені певні зусилля для розробки алгоритмів визначення параметрів ФМ, заснованих на ВАХ, отриманих у реальних умовах [30, 31].

До переваг 1D моделі слід віднести:

- невеликі вимоги до обчислювальних ресурсів при моделюванні ВАХ;
- адекватний опис реальних ВАХ в широкому діапазоні значень інтенсивності радіації та температури;
- можливість використання моделі для задач розрахунку та проектування фотоелектричних систем.

Серед недоліків 1-D моделі можна назвати опис ФЕ як однорідної системи за розподілом температури та освітлення, а також невизначеність початкових значень параметрів моделі, які задаються для ітерацій при

чисельному рішенні нелінійних рівнянь. Але незважаючи на це, вона є однією з найпоширеніших моделей ФЕ завдяки своїй простоті та гнучкості: на її основі створюються більш детальні схеми заміщення фотоелектричних модулів, які складаються зі схем заміщення комірок (рис. 1.7); її можна використовувати для опису ВАХ при частковому затіненні ФМ. Застосування розвинутих методів апроксимації дозволяє значно підвищити точність оцінки параметрів з точки зору нормалізованої середньоквадратичної похибки (див. розд. 3.1.4).

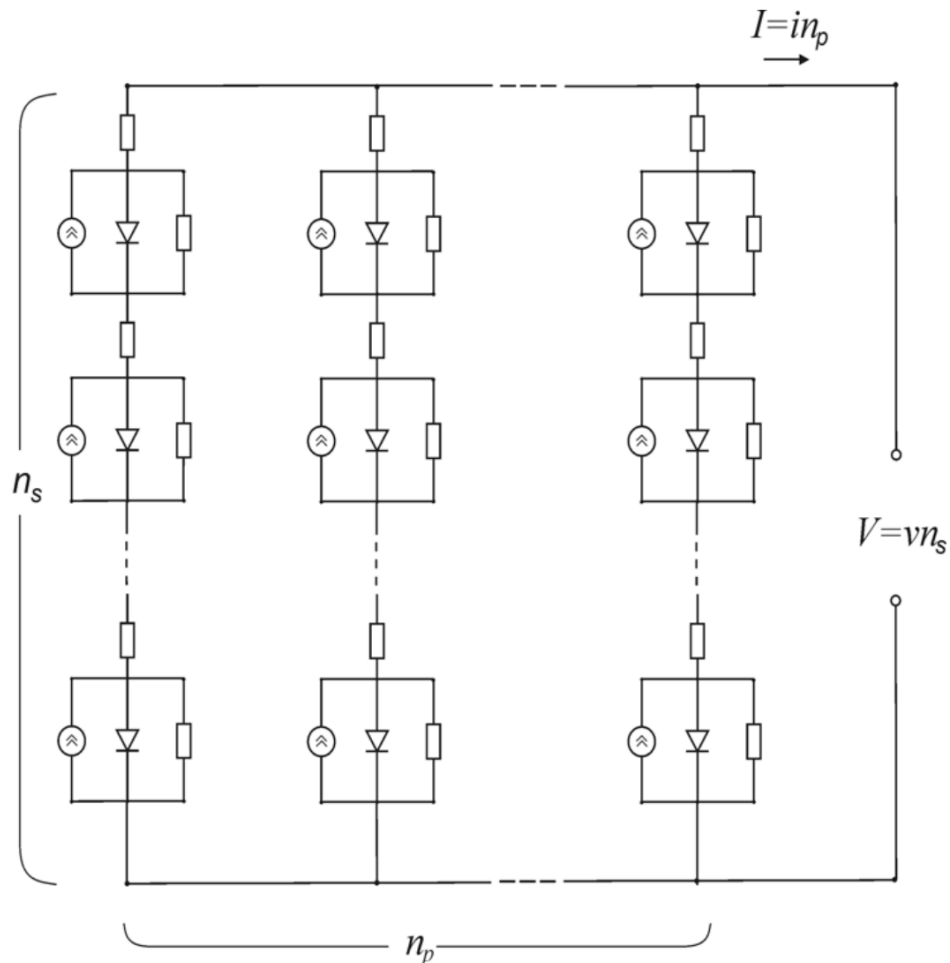


Рисунок 1.7 Схема заміщення з'єднаних комірок у ФМ
 $(n_s$ – кількість послідовно з'єднаних комірок,
 n_p – кількість паралельно з'єднаних комірок)

1.4.2 Дводіодна модель (2-D модель)

Якщо вважати, що результуючий струм через pn -перехід складається з дифузійної та рекомбінаційної компонент, можна за принципом суперпозиції ввести в схему заміщення два діоди: перший діод є «ідеальним» діодом із

зворотним струмом i_{01} та параметром ідеальності A_1 , що описує дифузійну компоненту, а другий діод із зворотним струмом i_{02} відповідає рекомбінаційній компоненті з параметром A_2 . В цілому, згідно з дводіодною моделлю, щільність струму ФЕ описується наступним чином:

$$i(v) = i_{ph} - i_{01} \left[\exp\left(\frac{v}{A_1 \cdot V_T}\right) - 1 \right] - i_{02} \left[\exp\left(\frac{v}{A_2 \cdot V_T}\right) - 1 \right] \quad (1.13)$$

Відповідна схема заміщення показана на рис. 1.8.

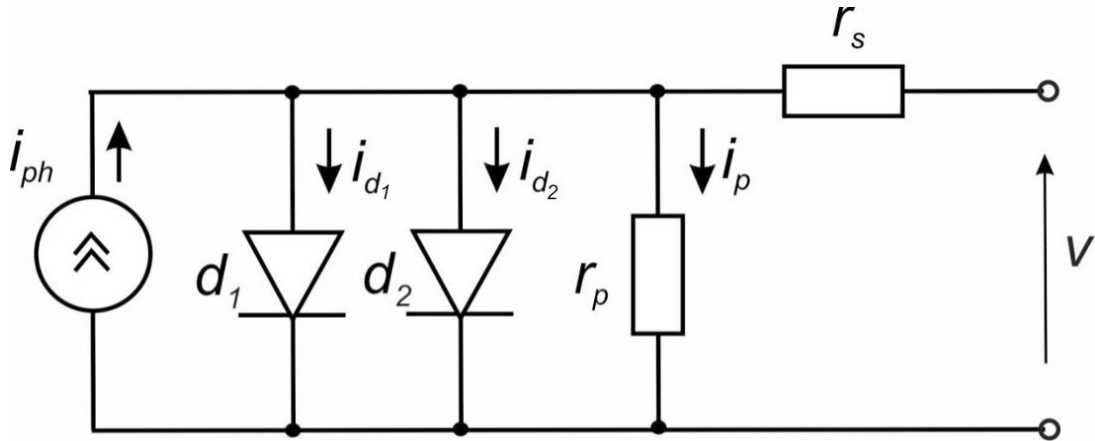


Рисунок 1.8 Дводіодна схема заміщення ФМ

У дводіодну модель, у порівнянні з 1-D моделлю, введений другий діод зі своїми параметрами зворотного струму та коефіцієнта ідеальності. При врахуванні додаткового шунтуючого струму через цей діод, отримаємо наступне рівняння для ВАХ ФЕ:

$$i(v) = i_{ph} - i_{01} \cdot \left[\exp\left(\frac{v + i \cdot r_s}{A_1 \cdot V_T}\right) - 1 \right] - i_{02} \cdot \left[\exp\left(\frac{v + i \cdot r_s}{A_2 \cdot V_T}\right) - 1 \right] - \frac{v + i \cdot r_s}{r_p}, \quad (1.14)$$

де i_{02} , A_2 – зворотній струм насичення та коефіцієнт ідеальності третього діода.

До переваг дводіодної моделі слід віднести:

- більш точне моделювання I-V характеристик, особливо, в області MPP [32], а також при умовах низького рівня сонячної радіації;
- можливість у спрощеному варіанті врахувати процеси рекомбінації носіїв у зоні збіднення;

- більш адекватний, ніж у 1D моделі опис ВАХ при різних зовнішніх умовах сонячної радіації та температури.

Недоліками цієї моделі є більш широкий набір параметрів (7-параметрична модель), більші вимоги до обчислювальних ресурсів та не зовсім фізичний опис *pn*-переходу як двох незалежних діодів з фіксованими темновими характеристиками.

В деяких дослідженнях дводіодна модель використовується для аналізу ФЕ на основі перовскітових та багат шарових структур.

1.4.3 Тридіодна модель (3-D модель)

Тридіодна схема заміщення є подальшим розвитком однодіодної та дводіодної моделей, що використовується для врахування більш складних фізичних процесів у сонячних елементах. Її основною метою є точніше моделювання внутрішніх втрат і витоків струму через границі зерен та периферійні області сонячного елемента. Ця схема аналогічна дводіодній схемі (рис. 1.8), але містить три діода (рис. 1.9) та залежить від 9 параметрів.

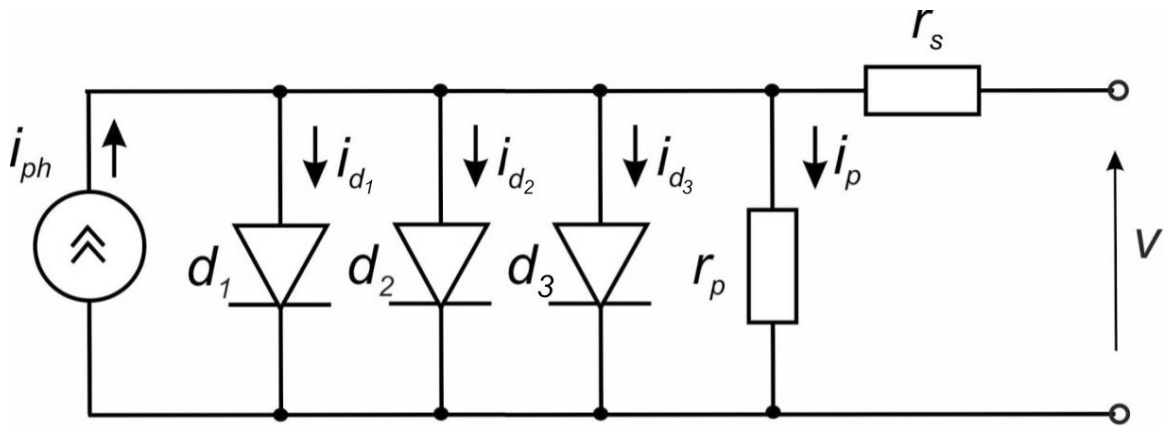


Рисунок 1.9 Тридіодна схема заміщення ФМ

Рівняння для струму в навантаженні виглядає наступним чином:

$$i(v) = i_{ph} - i_{01} \cdot \left[\exp\left(\frac{v + i \cdot r_s}{A_1 \cdot V_T}\right) - 1 \right] - i_{02} \cdot \left[\exp\left(\frac{v + i \cdot r_s}{A_2 \cdot V_T}\right) - 1 \right] - i_{03} \cdot \left[\exp\left(\frac{v + i \cdot r_s}{A_3 \cdot V_T}\right) - 1 \right] - \frac{v + i \cdot r_s}{r_p}, \quad (1.15)$$

де i_{03} , A_3 – зворотній струм насичення та коефіцієнт ідеальності третього діода.

Серед переваг тридіодної моделі є можливість отримати більш точну апроксимацію експериментальних ВАХ, особливо знятих при низькому рівні сонячної радіації та значних витоках струму. Недоліками є штучне представлення струмових процесів у ФЕ набором діодів з фіксованими параметрами, а також складність процедури багатопараметричної оптимізації.

1.4.4 Інші моделі ФЕ

Окрім діодних, існують інші моделі та схеми заміщення, які описують навантажувальну ВАХ фотоелектричних елементів та будуть коротко десь розглянуті.

Кусково-лінійна модель (piecewise linear, PL) заміщення ВАХ

ВАХ представляється лінійними відрізками, а схема заміщення виглядає як паралельно включені гілки з діодами та DC джерелами живлення (рис. 1.10).

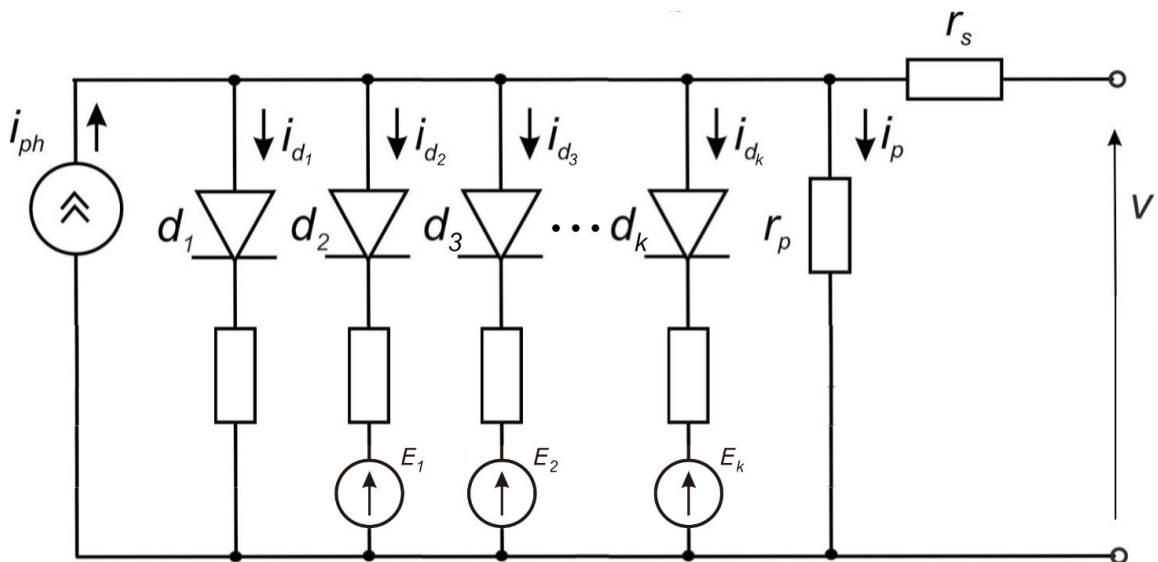


Рисунок 1.10 Кусково-лінійна модель заміщення ФМ

Кожен діод в даній моделі представлений як вентиль з двома станами: увімкнено та вимкнено. Послідовно з діодом включений резистор забезпечує необхідний струм на відповідній омичній ділянці фрагментованої ВАХ.

Ця модель дозволяє звести нелінійну задачу оптимізації до обчислення параметрів лінійних фрагментів схеми заміщення. Вона може використовуватись для швидкого аналізу ФЕ у різних зовнішніх умовах та не

потребує значних обчислювальних ресурсів. В той же час кусково-лінійна модель дає низьку точність у випадку ВАХ з високою нелінійністю.

Модель з використанням N-канального MOSFET

Цей підхід спрощує рівняння вихідних характеристик ФМ за рахунок використання N-канального MOSFET з короткозамкнутими затвором і стоком. Основним компонентом моделі є транзистор, який дозволяє уникнути експоненціальних членів у рівняннях і зменшує кількість невідомих параметрів. До недоліків моделі слід віднести спрощення складних фізичних процесів у напівпровідникової структури.

Модель Бішоп

Модель Бішоп, розроблена у 1988 році, використовується для симуляції ФМ у різних конфігураціях, враховує поведінку ФМ у другому квадранті.

Основні рівняння базуються на системі нелінійних рівнянь, які вирішуються методами чисельної оптимізації, такими як метод Ньютона.

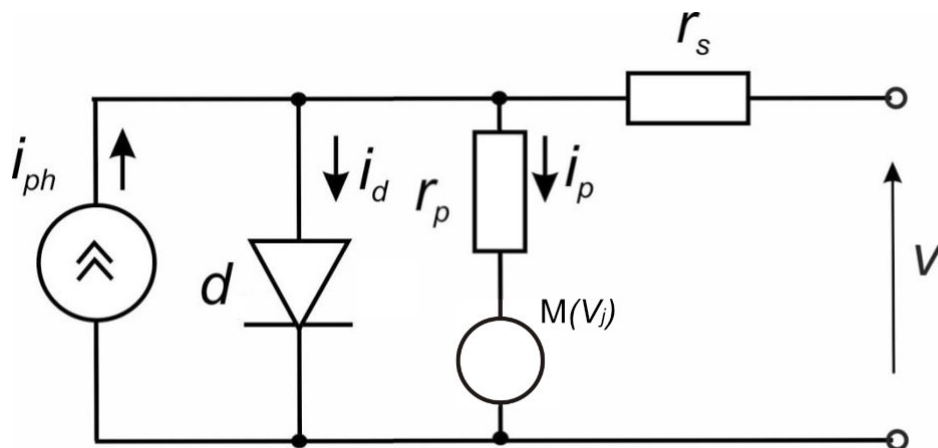


Рисунок 1.11 Модель Бішоп

Переваги:

- можливість аналізу енергетичних втрат і продуктивності модулів у складних умовах затінення;
- використання у різних програмних середовищах, таких як Matlab, PSpice та інші.

Недоліки:

- висока складність розрахунків;
- не враховує всі аспекти фізичної поведінки модулів.

Нейронні моделі

Нейронні моделі, такі як багат шаровий перцептрон, використовуються для передбачення ефективності ФЕ на основі вхідних даних про радіацію та температуру. Наприклад, мережа з двома вхідними нейронами (радіація, температура) та дев'ятьма прихованими нейронами з сигмоїдною функцією активації дозволяє моделювати поведінку ФМ.

До переваг нейронних моделей можна віднести гнучкість та адаптивність до широкого діапазону зовнішніх умов, високу точність прогнозування, а до недоліків – залежність від якості тренувальних даних та складність інтерпретації результатів.

1.5 Методи визначення параметрів ФМ

Моделювання та визначення параметрів ФМ є важливим для оцінки їх якості, можливості ефективно працювати в різних умовах експлуатації, а також для задач оптимального проектування фотоелектричних станцій. Протягом багатьох років було запропоновано багато підходів та методів розрахунку характеристик та параметрів ФМ. Історія визначення або, іншим словом, екстракції параметрів сонячних елементів починається з 70-80-х років попереднього століття (наприклад, [33]). Зазвичай моделювання ФЕ базується на відповідних електричних еквівалентних схемах, розглянутих у попередньому розділі дисертації. Набір параметрів цих схем представляє фізичні властивості ФМ, які обумовлюють специфіку їхньої роботи в складі електричних енергетичних систем.



Рисунок 1.12 Методи екстракції параметрів ФМ

Методи розрахунку, що використовуються під час визначення параметрів ФМ, поділяються на аналітичні, на основі математичних рівнянь, та метаевристичні методи, що використовують цільову функцію для оптимізації (рис. 1.12)

1.5.1 Аналітичні методи

Визначення параметрів ФМ не є тривіальною задачею, оскільки вони зазвичай не надаються безпосередньо у таблицях даних модулів (datasheet) від виробників. Тому у ряді робіт пропонуються аналітичні співвідношення для оцінки параметрів ФМ на основі таких табличних даних. Наприклад, в роботах [34, 35, 36] п'ять параметрів однодіодних еквівалентних схем виражаються через значення (I, V) в точках короткого замикання, максимальної потужності та холостого ходу. Експериментальні значення в цих точках можуть бути

доповнені даними (P, V) з кривої потужності, що дозволяє отримати замкнуту систему трансцендентних рівнянь для параметрів ФМ [37]. Паспортні дані, надані виробником для різного типу ФМ, а також експериментальні дані з температури та поглинутої сонячної радіації були застосовані в роботі [38] для побудови модельної кривої струм–напруга та порівняння її з експериментальними даними для інтегрованої фотоелектричної установки в будівлі Національного інституту стандартів і технологій (NIST, США). Більш детальний огляд робіт цього напрямку наведений в статті [39].

Більш повне врахування поведінки ВАХ шляхом додавання значень похідних (провідності) у точках короткого замикання та холостого ходу було зроблено в ряді робіт [40, 41]. Експериментальні дані I_{sc} , V_{oc} , I_{MPP} , V_{MPP} , а також провідності в точках КЗ, ХХ можуть використовуватись як параметри в системі нелінійних рівнянь, складених для набору $\{I_{ph}, I_0, A, R_s, R_p\}$ [37]. У науковій літературі опубліковані протягом кількох десятиліть різноманітні методи і прийоми, спрямовані на вирішення систем нелінійних рівнянь для параметрів ФЕ (див. огляд в [37]).

До аналітичних методів визначення параметрів ФЕ відносяться підходи, засновані на точному рішенні нелінійного рівняння за допомогою функції Ламберта [42-44], яка дозволяє отримати явний аналітичний вираз для струму у ФЕ. В цьому виразі присутні тільки три невідомих параметри: A , R_s , R_p ; вони знаходяться чисельним методом підгонки під експериментальні дані. Ламберта W-функція (LW) використовується також при моделюванні поведінки ФЕ в умовах часткового затінення.

В роботі [45] був запропонований метод екстракції величин $\{I_{ph}, I_0, A, R_s, R_p\}$, заснований на аналітичному розкладанні системи нелінійних рівнянь для основних робочих точок ВАХ за малими параметрами. Частина потрібних величин, а саме I_{ph} , R_s , R_p , обчислювалась за аналітичними виразами, а величини I_0 , A потім знаходились за допомогою певного ітераційного алгоритму. Цей підхід не вимагає знання апріорі початкових значень параметрів ФЕ для вирішення нелінійних рівнянь, і дозволяє контролювати

кожен крок розрахунку. Слід зазначити, що загальна проблема вибору початкових значень параметрів дуже суттєво впливає на кінцевий результат, і усунення цієї проблеми, як запропоновано в роботі, покращує точність та швидкість оптимізаційної процедури.

1.5.2 Метаевристичні методи

За останні роки була опублікована дуже велика кількість робіт, присвячених різноманітним метаевристичним методам екстракції параметрів ФЕ (див. огляд в [46]). Найбільш поширеними і популярними серед дослідників є генетичний алгоритм (Genetic Algorithm, GA), ройова оптимізація (Particle swarm optimization PSO), метод імітованого відпалу (simulated annealing, SA), еволюційний алгоритм (Evolutionary Algorithm, EA), диференціальна еволюція (Differential Evolution(DE), метод штучної нейронної мережі (artificial neural network. ANN), метод штучної імунної системи (Artificial Immune System, AIS), алгоритми нечіткої логіки (Fuzzy Logic, FL) та нейронної мережі (Neural Network, NN).

Можливості цих методів можна коротко охарактеризувати наступним чином. Генетичний алгоритм (GA) в завданні екстракції параметрів ФЕ забезпечує не дуже високу точність визначення послідовного опору: авторам [47] вдалось її підвищити з $\pm 100\%$ до $\pm 7\%$. Оптимізація методом рою частинок PSO при застосуванні до одно- та дводіодних моделей показує більш кращі результати у порівнянні з генетичними алгоритмами [48]. В дослідженні [49] показано, що метод PSO демонструє найкращу ефективність і найменшу похибку ($RMSE=1,73 \cdot 10^{-4}$ А для одnodіодної моделі), ніж всі алгоритми, що аналізувалися в роботі. У порівнянні зі звичайними градієнтними методами, навіть без хороших початкових припущень, метод PSO може давати значення параметрів, які забезпечують гарну відповідність експериментально отриманим залежностям $I(V)$, $P(V)$. Детальному аналізу результатів розрахунків параметрів ФЕ іншими метаевристичними методами присвячені статті [50-53].

До методів, заснованих на природних явищах, відноситься алгоритм Flight Bat. Автори [54] запропонували покращення цього алгоритму шляхом

додавання та включення розширеного польоту Леві, що сприяє диверсифікації рішень (ELBA). З точки зору обчислень, основні інновації ELBA полягають у наступному введенні специфічного математичного виразу для підвищення диверсифікації нових рішень; прийнятті математичного виразу, заснованого на польоті Леві, для виконання ефективного локального пошуку; і виборі нових рівнянь для оновлення певних керуючих параметрів, які забезпечують кращий баланс між механізмами розвідки та експлуатації алгоритму.

Імперіалістичний конкурентний алгоритм (ICA) відноситься до методів, заснованих на людській поведінці. Запропонована [55] обмежена цільова функція виводиться з кривої «напруга-потужність» фотоелектричної системи з використанням рівняння відстеження максимальної потужності. В свою чергу, [56] визначають параметри за допомогою багатовекторної оптимізації (MVO). Методологія, заснована на MVO, застосовується для генерації оптимальних значень параметрів ФЕ. Найкращі п'ять отриманих параметрів використовуються для моделювання поведінки ФЕ за різних умов, включаючи сонячне випромінювання та коливання температури. Серед сучасних алгоритмів варто відзначити War Strategy Optimization (WSO), розроблений Аууагао і Кумар (2022). Цей метаевристичний підхід базується на принципах військової стратегії і був перевірений на SDM. Zhang та ін. (2020) запропонували алгоритм на основі нормального розподілу (GNDO), який використовує два основних етапи оптимізації: дослідження та експлуатацію.

Гібридні підходи поєднують кілька методів для досягнення високої точності. Наприклад, алгоритм АОА у поєднанні з методом Ньютона-Рафсона забезпечує баланс між дослідженням і експлуатацією пошукового простору. Подібно, МРА з адаптивною еволюцією дозволяє оптимізувати складні моделі, такі як TDM. Інші приклади включають GWO у поєднанні з CS для моделювання параметрів SDM і DDM.

РОЗДІЛ 2. СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ВАХ ФМ ТА ЇЇ ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ПРИЗНАЧЕННЯ

2.1 Необхідність розробки системи вимірювання ВАХ ФМ

Для проектування фотоелектричних систем, які можуть працювати в різних зовнішніх умовах зі змінними радіацією та температурою, вкрай необхідні моделі у вигляді еквівалентних електричних схем заміщення з параметрами, що відповідають умовам експлуатації. Тому дуже актуальною є задача отримання детальних експериментальних даних, перш за все, навантажувальних ВАХ ФМ саме в тих умовах, в яких буде працювати ФЕС (польові умови).

Коротко проаналізуємо експериментальні системи та комерційні установки, які розроблені до даного часу для вимірювання та обробки ВАХ ФМ. Багато виробничих компаній пропонують свої продукти (наприклад, [57-63]) Для отримання ВАХ ФМ в польових умовах використовуються також спеціалізовані вимірювальні системи, серед яких Seaward PV200 [64], Meco Solar Module Analyzer [65], MP-11 I-V Checker [66], Eko Rack Mountable I-V Tracer [67], Togami PV Doctor [68].

Дані прилади дозволяють, як правило, отримувати тільки базові параметри ФМ для попередньої оцінки роботоздатності ФМ, а детальний аналіз необхідних електричних характеристик із визначенням параметрів, що необхідні для діагностування поточного стану модулів, може бути проблематичним. Характерні недоліки комерційних систем тестування ФМ:

1. *Висока вартість.* Сучасні комерційні системи для вимірювання ВАХ є дороговартісними і важкодоступними, крім того функціонал таких систем не завжди відповідає потребам технічних обстежень і зовсім не задовольняє вимогам наукових досліджень.
2. *Низька точність вимірювання.* Більшість комерційних сканерів ВАХ мають певний компроміс між масштабом, точністю та швидкістю зчитування даних, що не дозволяє досягти достатньої точності у дослідженнях з малими змінами параметрів ФМ.

3. *Обмежена кількість точок вимірювання.* У комерційних системах часто використовується дискретна фіксація значень струму та напруги з невеликою кількістю точок вимірювання (відліків). Це призводить до неповного та недостатньо детального відтворення реальної форми ВАХ, особливо в околиці точки максимальної потужності (МРР).
4. *Висока «зашумленість» отриманих даних.* Через низьку швидкість вимірювання системи для польових вимірювань ВАХ залежні від впливу зовнішніх завад, які можуть спотворювати результати вимірювань. Це особливо актуально при роботі за змінних умов сонячної радіації чи температури.
5. *Недостатня гнучкість.* Комерційні сканери ВАХ зазвичай є закритими системами, які не дозволяють модифікувати апаратну частину або змінювати алгоритми зчитування та обробки даних, а також вимагають використання пропрієтарного програмного забезпечення для роботи з отриманими даними. Це обмежує можливість їх використання для задач, що виходять за рамки стандартного тестування.

Враховуючи описані вище недоліки готових комерційних пропозицій, що прямо впливають на можливість отримувати якісні ВАХ ФМ в польових умовах експлуатації, зберігаючи при цьому гнучкість налаштувань процесу виміру, було прийнято рішення про розробку і виготовлення власної вимірювальної системи для зняття ВАХ ФМ в реальних умовах.

Варто сказати також про використання в наукових роботах програмних моделей ФМ, які відтворюють ВАХ ФМ в програмному середовищі, наприклад, MATLAB Simulink [69-73], але такі підходи використовують параметри ФМ, які були отримані заздалегідь з експериментальних даних.

2.2 Огляд методів вимірювання ВАХ ФМ

Важливою задачею в розробці системи тестування є вибір оптимального методу вимірювання ВАХ, що буде використовуватись в основі системи. Відома достатня кількість різних підходів до зняття ВАХ ФМ [74-82].

Вимірювання ВАХ ФМ найчастіше відбувається за допомогою керування струмом, який проходить через ФМ, а різниця підходів полягає в точності даних, загальній вартості та габаритах обладнання, швидкості та зручності використання.

Метод змінного опору навантаження

Метод є найпростішим з розглянутих. До ФМ в якості навантаження підключається магазин змінного опору або певна кількість резисторів різного номіналу, опір змінюється від режиму короткого замикання до режиму холостого ходу. Одночасно зі зміною опору навантаження відбувається вимірювання значень напруги і струму ФМ. Енергія, що виробляється ФМ, у вигляді тепла розсіюється на навантаженні, тому вимірювана потужність досить обмежена.

Керування опором може здійснюватися вручну [83] або використовуючи масив перемикачів (наприклад, реле) і резисторів [84], які керуються автоматично, що дозволяє значно збільшити швидкість вимірювань. Резистори обирають так, щоб якнайкраще охопити зону перегин ВАХ.

Недоліком є досить громіздка і важка конструкція, та фіксований набір резисторів, що призводить до малої кількості точок та нерівномірного покриття кривої ВАХ, а також низька швидкість вимірювання.

Метод ємнісного навантаження

До ФМ в якості навантаження підключається конденсатор великої ємності [85]. На початку вимірювання конденсатор перемикається з закороченого режиму на підключення до ФМ, після чого ФМ переходить від режиму КЗ до режиму ХХ, заряджаючи конденсатор. Під час заряду відбувається вимірювання струму і напруги ФМ. Швидкість вимірювання ВАХ напряму залежить від ємності конденсатора та параметрів ФМ.

Для отримання репрезентативних кривих ВАХ, необхідно використовувати правильно підібрані конденсатори з низьким послідовним опором. Також, неможливим є часткове відтворення певного режиму або частини кривої.

Метод електронного навантаження

В якості навантаження ФМ використовується транзистор (зазвичай MOSFET) в лінійному режимі роботи [86], що зменшує його комутаційні характеристики. Опір між стоком і витокom змінюється через зміну напруги на затворі-витокu, що призводить до зміни стану ФМ від ХХ до КЗ. Одночасно відбувається вимір струму та напруги. Використання даного методу обмежується ФМ середньої потужності через розсіюванням виробленої ФМ енергії на транзисторі.

Перевагою є можливість швидко змінювати опір від короткого замикання до холостого ходу. Даний метод потребує додаткового охолодження транзисторів, а також окрему схему для чіткого управління транзистором, оскільки характеристики транзистора можуть відрізнятися один від одного в каскаді транзисторів і змінюватися під впливом температури.

Метод біполярного підсилювача

Метод базується на електричній схемі, яка дозволяє змінювати напрямок струму і напруги в модулі, що робить можливим вимірювання темнових ВАХ модуля [87]. Схема побудована на основі класичного підсилювача класу В і використовує два біполярних транзистори як навантаження для прямого і зворотного струмів. Біполярні транзистори працюють у трьох режимах (відсічення, активний і насичення), а більша частина потужності модуля розсіюється на цих елементах, що обмежує застосування методу.

Метод 4-х квадрантного блока живлення

4х-квадрантний блок живлення – це система, яка може виступати як джерелом, так і споживачем струму з біполярною напругою [83, 88]. Дозволяє отримувати ВАХ ФМ в другому і четвертому квадранті. Подібний метод має обмеження через високу вартість і складність, особливо для потужностей понад 1 кВт, що ускладнює застосування для декількох ФМ.

Метод DC-DC перетворювача

Здатність DC-DC перетворювачів імітувати резистор можливо застосувати для отримання ВАХ ФМ. Основні типи перетворювачів подібні до

трансформаторів постійного струму як у режимі неперервної провідності (CCM), так і у режимі неповної провідності (DCM). Співвідношення трансформації в таких перетворювачах керується електронним способом, змінюючи робочий цикл, що призводить до зміни еквівалентного опору, який виступає як імітований резистор на клеммах ФМ.

На основі цієї методики в роботах [89, 90] запропоновано автоматизовані системи для вимірювання ВАХ, зокрема з використанням різних топологій DC-DC перетворювачів. Аналіз, проведений у [91], показує, що лише топології, похідні від Buck-Boost, дозволяють повне охоплення кривої. Одним із недоліків є пульсації струму через індуктивність, що викликано методом комутації.

2.3 Основні характеристики системи вимірювання ВАХ ФМ

Призначенням системи вимірювання є зняття ВАХ окремих чи декількох ФМ, підключених послідовно у вигляді серії, вимірювання температури ФМ та рівня сонячної радіації, обробка отриманих експериментальних даних, з можливістю подальшої екстракції параметрів, вивід отриманих результатів у зручному користувацькому інтерфейсі.

Функціональні можливості та технічні характеристики, яким повинна відповідати розроблена вимірювальна система:

Максимально допустимі параметри приєднаних ФМ:

- Струм КЗ – до 15 А;
- Напруга ХХ – до 95 В;
- Потужність – до 600 Вт.

Параметри ФМ, що система визначає та відображає після проведення виміру:

- Графічне зображення експериментальних даних;
- Графічне зображення апроксиманти ВАХ;
- Графічне зображення залежності потужності від напруги $P(U)$;
- Струм КЗ I_{sc} ;
- Напруга ХХ U_{oc} ;
- Точка максимуму потужності P_{max} , I_{mpp} і U_{mpp} ;

- Коефіцієнт ідеальності діода A ;
- Послідовний опір втрат R_s ;
- Паралельний опір втрат R_p ;
- Фотострум I_{ph} ;
- Зворотній струм насичення діода I_0 .
- Фактор заповнення FF .

Додаткові можливості:

- Приєднання датчиків температури;
- Приєднання датчиків сонячної радіації;
- Автономне живлення;
- Автоматичні вимірювання;
- Віддалений доступ;
- Збереження вимірів та доступ до них.

Важливою вимогою до системи є здатність проводити точні вимірювання як в лабораторних, так і в польових умовах, які характеризується зміною та неоднорідністю сонячної радіації, зміною температури навколишнього середовища, розташуванням ФМ в довільних місцях.

Сукупність усіх задач розробки поділяється на окремі компоненти, які відповідають за кожен частину системи і відповідну функціональність, їх взаємозв'язок відображено у вигляді блок-схеми (рис. 2.1).

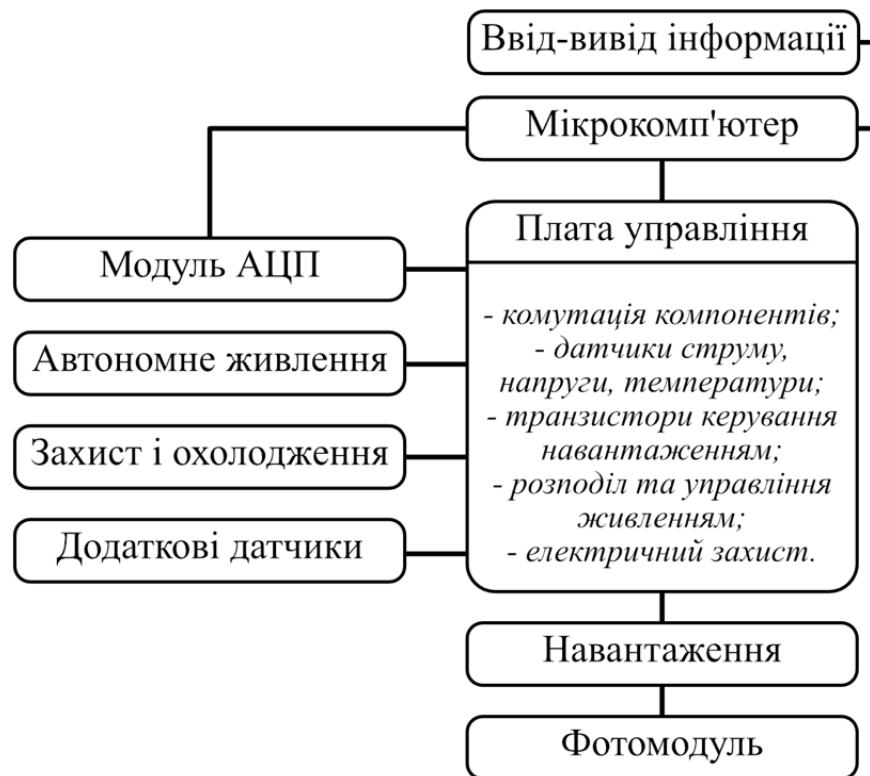


Рисунок 2.1 Блок-схема взаємозв'язків основних компонентів системи тестування

Основні компоненти вимірювальної системи та їх призначення:

Мікрокомп'ютер – виконання необхідних розрахунків, зберігання інформації, управління іншими частинами приладу;

Система вводу-виводу інформації – орган управління приладом для задання необхідних параметрів та зчитування результатів;

Аналого-цифровий перетворювач – обробка сигналів та їх передача до мікрокомп'ютера;

Плата управління – інтерпретація управляючих сигналів від мікрокомп'ютера, управління навантаженням, комутація інших компонентів;

Навантаження – керування струмом ФМ під час вимірювання ВАХ;

Автономне живлення – забезпечення безперебійного живлення системи, необхідне для польових, автоматичних та віддалених вимірювань;

Додаткові датчики – контроль температури компонентів системи, виміри температури ФМ та рівня сонячної радіації під час вимірювання ВАХ;

Захист та охолодження – підтримка нормального режиму роботи.

2.4 Компоненти навантажувальної частини

Ключовою складовою вимірювальної системи, яка безпосередньо бере участь у визначенні ВАХ ФМ, є навантажувальна частина. Правильний вибір навантажувальної частини та забезпечення відповідності її параметрів розрахунковим значенням значно впливають на точність і швидкість проведення вимірювань, максимальні допустимі значення струму, напруги та потужності, а також на масо-габаритні показники системи та її загальну вартість.

Спираючись на огляд методів в розділі 2.2, основою даної вимірювальної системи обрано метод ємнісного навантаження. Даний метод передбачає використання одного чи декількох конденсаторів великої ємності. Під час збільшення заряду конденсатора струм ФМ поступово зменшується, а напруга ФМ зростає (рис. 2.2)

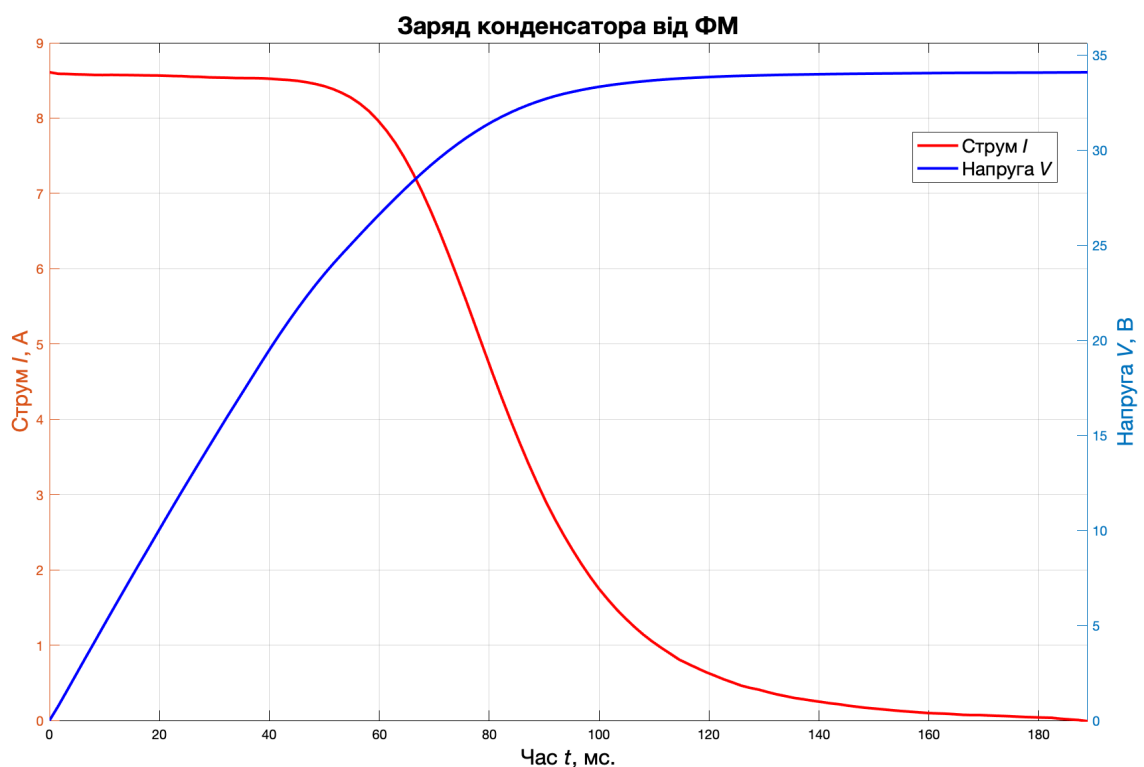


Рисунок 2.2 Струм та напруга під час зарядки конденсатора від ФМ

Ємнісний метод обрано на основі низки переваг:

Простота реалізації – не вимагає складних електронних компонентів чи алгоритмів управління;

Плавність вимірювання – дозволяє здійснювати плавний перехід від режиму КЗ до режиму ХХ, охоплюючи весь діапазон робочих параметрів ФМ.

Широкий діапазон напруг і струмів – великий вибір конденсаторів і можливість їх комбонування дозволяє вимірювати як одну ФЕК, так і весь масив ФМ.

Відсутність необхідності в додаткових потужних джерелах живлення – оскільки весь процес залежить від власної роботи ФМ.

Компактність і мобільність – конденсатори мають відносно невеликі розміри та вагу, що дозволяє створювати компактні вимірювальні пристрої, зручні для транспортування і використання в польових умовах.

Економічність – завдяки простій конструкції системи та мінімальній кількості компонентів, ємнісний метод є відносно дешевим у реалізації.

Низький рівень шумів у системі – використання пасивних компонентів, таких як конденсатори, сприяє зменшенню рівня електричних шумів, що позитивно впливає на якість отриманих результатів.

2.4.1 Особливості роботи та визначення оптимальних параметрів конденсаторів

Важливою задачею є розрахунок необхідною сумарної ємності конденсаторів, визначення окремих їх параметрів, а також схеми з'єднання, та підбір конденсаторів відповідних параметрів з малим внутрішнім опором.

Ключовими параметрами конденсаторів для використання в якості ємнісного навантаження є робоча напруга, ємність та ESR. Зважаючи на ці критерії, використано алюмінієві електролітичні конденсатори. Вони мають найбільшу серед поширених конденсаторів ємність (до кількох сотень тисяч мкФ) та високу максимальну робочу напругу, яка може досягати до 500 вольт.

Серед недоліків даного типу конденсаторів можна виділити полярність, великий струм саморозряду, зменшення ємності зі збільшенням частоти. Проте зазначені недоліки не є критичними для даної вимірювальної системи, адже ФМ генерують постійний струм, а за логікою роботи системи конденсатори не повинні зберігати свій заряд протягом тривалого часу.

При виборі електролітичного конденсатора важливим є значення ESR – еквівалентний послідовний опір, що описує омичні втрати на виводах та обкладках конденсатора [92]. Значення ESR повинно бути якомога меншим. Значний вплив також має сумарна ємність системи навантаження, що впливає на швидкість вимірювання та загальну кількість експериментальних відліків, їх розподіл вздовж ВАХ та на максимально допустимі параметри приєднаних ФМ.

Для забезпечення точності вимірювань необхідно, щоб перехідні процеси, викликані зарядом внутрішньої ємності ФМ, завершувалися до вимірювання значень. Сучасні тонко-плівкові ФМ та високоефективні кремнієві ФМ можуть демонструвати значну внутрішню ємність [93]. Вона разом із наявними опорами утворює RC-коло, яке додає до процесу вимірювання транзитну часову постійну. Ця величина залежить від таких параметрів, як робоча точка, температура, рівень сонячної радіації, час життя неосновних носіїв заряду та інших властивостей напівпровідника.

Неправильний вибір часу сканування ВАХ може суттєво спотворити результати. Занадто короткий час може спричинити значну похибку, яка визначається динамічними властивостями сонячного елемента. Водночас, занадто довгий час виміру в рамках польових досліджень може спричинити похибки, пов'язані з неоднорідністю та мінливістю освітлення ФМ.

Оптимальний час сканування має бути максимально коротким, але достатнім для мінімізації впливу динамічної похибки. Шляхом порівняння прямого і зворотного виміру ВАХ можна виявити недостатній час сканування – у таких випадках спостерігається гістерезис, що проявляється у недооцінці реальної ВАХ під час прямого сканування та переоцінці під час зворотного [94]. Ця похибка не усувається ані шляхом усереднення обох кривих, ані підсумовуванням помилок кожного напрямку. Гістерезис та вплив ємнісних властивостей сонячних елементів широко вивчено [94, 95].

На рис. 2.3 зображено викривлення графіку кривої ВАХ в результаті недостатнього часу сканування – протягом 10 мс (чорна пунктирна лінія) та 4 мс (червона пунктирна лінія).

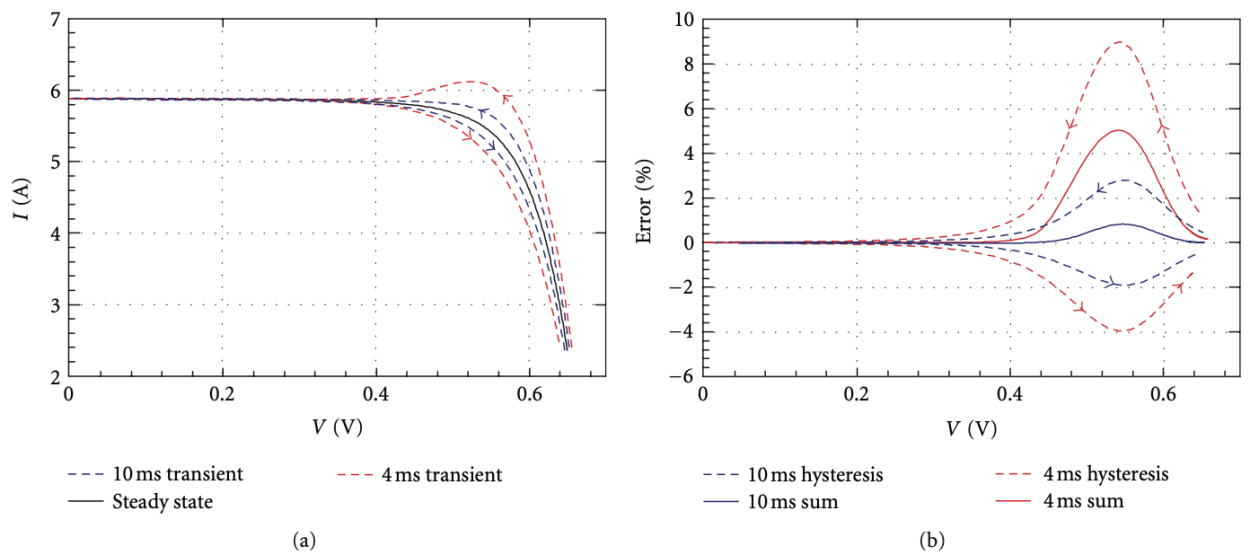


Рисунок 2.3 Гістерезис ВАХ внаслідок прямого та зворотного вимірів (а), відповідні похибки, спричинені внутрішньою ємністю (б) (стрілки вказують напрямок виміру).

Прийнято вважати, що достатнім часом виміру є тривалість сканування від КЗ до ХХ більше 50 мс. Додатково провівши експериментальні виміри ВАХ на основі резистивного навантаження з часом виміру більше 100 мс гістерезису не виявлено, отже процес відбувався з такою швидкістю, що вимірювання виконувались за рівномірного розподілу носіїв заряду.

2.4.2 Розрахунок часу заряду конденсатора від ФМ

Для спрощення розрахунку часу заряду конденсатора від ФМ його можна вважати джерелом струму від КЗ до МРР, а в діапазоні від МРР до ХХ – джерелом напруги. В даному випадку єдиним навантаженням, підключеним до ФМ, є ємність C , при цьому внутрішній опір ємності вважається нескінченним.

На першому етапі зарядження конденсатор поводить себе як коротке замикання, а його напруга лінійно зростає до V_0 . Зарядження конденсатора від ФМ в режимі джерела постійного струму (перший діапазон ВАХ):

$$v(t) = \frac{I_{sc}}{C} \cdot t, \quad (2.1)$$

$$0 \leq t \leq t_0,$$

де I_{sc} – струм короткого замикання ФМ, який залежить від рівня сонячної радіації та температури;

C – ємність конденсатора, яка визначає швидкість зміни напруги;

t_0 – момент часу, коли напруга на конденсаторі досягає проміжного значення V_0 .

Зарядження конденсатора від ФМ в режимі джерела напруги відображає експоненціальний характер зміни напруги на конденсаторі (другий діапазон ВАХ):

$$v(t) = V_{oc} + (V_0 - V_{oc}) \cdot \exp\left(-\frac{t - t_0}{R_{eq} \cdot C}\right), \quad (2.2)$$
$$t \geq t_0,$$

де V_{oc} – напруга холостого ходу ФМ, що визначається температурою та властивостями модуля;

R_{eq} – еквівалентний опір системи, який залежить від втрат у елементів системи.

Загальний час зарядження конденсатора залежить як від параметрів системи, так і від ємності конденсатора:

$$t = t_0 + 5 \cdot R_{eq} \cdot C \quad (2.3)$$

Напруга V_{mpp} традиційних ФМ становить близько 80% від V_{oc} . Таким чином, еквівалентний опір:

$$R_{eq} \approx 0.2 \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad (2.4)$$

Розрахунок ємності конденсатора:

$$C = \frac{t \cdot I_{sc}}{V_{oc} + 4 \cdot R_{eq} \cdot I_{sc}} \quad (2.5)$$

або, спрощено:

$$C = 0.55 \cdot t \cdot \frac{I_{sc}}{V_{oc}} \quad (2.6)$$

Пропорційний коефіцієнт $A \approx 0.55$ підтверджено для різних технологій модулів [73]. Значення коефіцієнта залежить від параметрів модулів та конфігурації системи.

Значення ємності конденсатора для вимірювання ВАХ ФМ Risen RSM 120-6-285P, що має струм КЗ 9.4 А та напругу ХХ 38.58 В, при тривалості виміру 100 мс, розраховується наступним чином:

$$C = 0.55 \cdot t \cdot \frac{I_{sc}}{V_{oc}} = 0.55 \cdot 0.1 \cdot \frac{9.4}{38.58} = 13\,400 \text{ мкФ} \quad (2.7)$$

Обране мінімальне значення очікуваної тривалості виміру в 100 мс дозволяє мінімізувати негативний вплив перехідних процесів ФМ та одночасно дозволяє уникнути негативного впливу на ВАХ від зміни сонячної радіації.

2.4.3 Вибір компонентів та визначення їх конфігурації

З огляду на необхідну гнучкість системи, швидкість проведення експерименту та доступні до придбання варіанти обрано конденсатор ємністю 22000 мкФ та напругою 100В [96].

Час заряду даного конденсатора від ФМ Risen RSM 120-6-285P:

$$t_3 = \frac{C}{0.55} \cdot \frac{V_{oc}}{I_{sc}} = \frac{22000}{0.55} \cdot \frac{38.58}{9.4} = 164 \text{ мс} \quad (2.8)$$

Час заряду при вдвічі меншому струмі:

$$t_3 = \frac{22000}{0.55} \cdot \frac{38.58}{4.7} = 328 \text{ мс} \quad (2.9)$$

Загальний очікуваний час вимірювання ВАХ при обраному конденсаторі складає близько 164 мс, що відповідає раніше визначеним обмеженням. При зменшенні рівня сонячної радіації, що призведе до зменшення струму КЗ ФМ умовно вдвічі, час виміру складає менше 350 мс, чого достатньо для нівелювання впливу зовнішніх факторів на ВАХ ФМ.

Приблизний час виміру однієї пари значень струм-напруга за допомогою обраного АЦП (див. розд. 2.5.1) складає 1.6 мс, тому загалом буде отримано більше 100 експериментальних відліків для повної освітленості та більше 200 відліків для вдвічі меншого рівня сонячної радіації. Цієї кількості точок цілком достатньо для отримання ВАХ з необхідною точністю та покриттям.

Після проведення вимірювання перед початком наступного вимагається розрядка конденсатора, для цього обрано резистор АН25WJ-100R [97] номінальним опором 100 Ом та потужністю розсіювання 25 Вт.

Час розряду конденсатора на даний резистор:

$$t_p \cong 5 \cdot RC = 5 \cdot 100 \cdot 0,022 = 11 \text{ c} \quad (2.10)$$

Тривалість розрядки в 11 с. цілком прийнятна для проведення експериментів, в тому числі автоматичних. Опціонально реалізовано можливість використання двох конденсаторів, що пропорційно збільшить кількість відліків та час виміру і розряду. Загальну схему з'єднання ємнісного навантаження зображено на рис. 2.4.

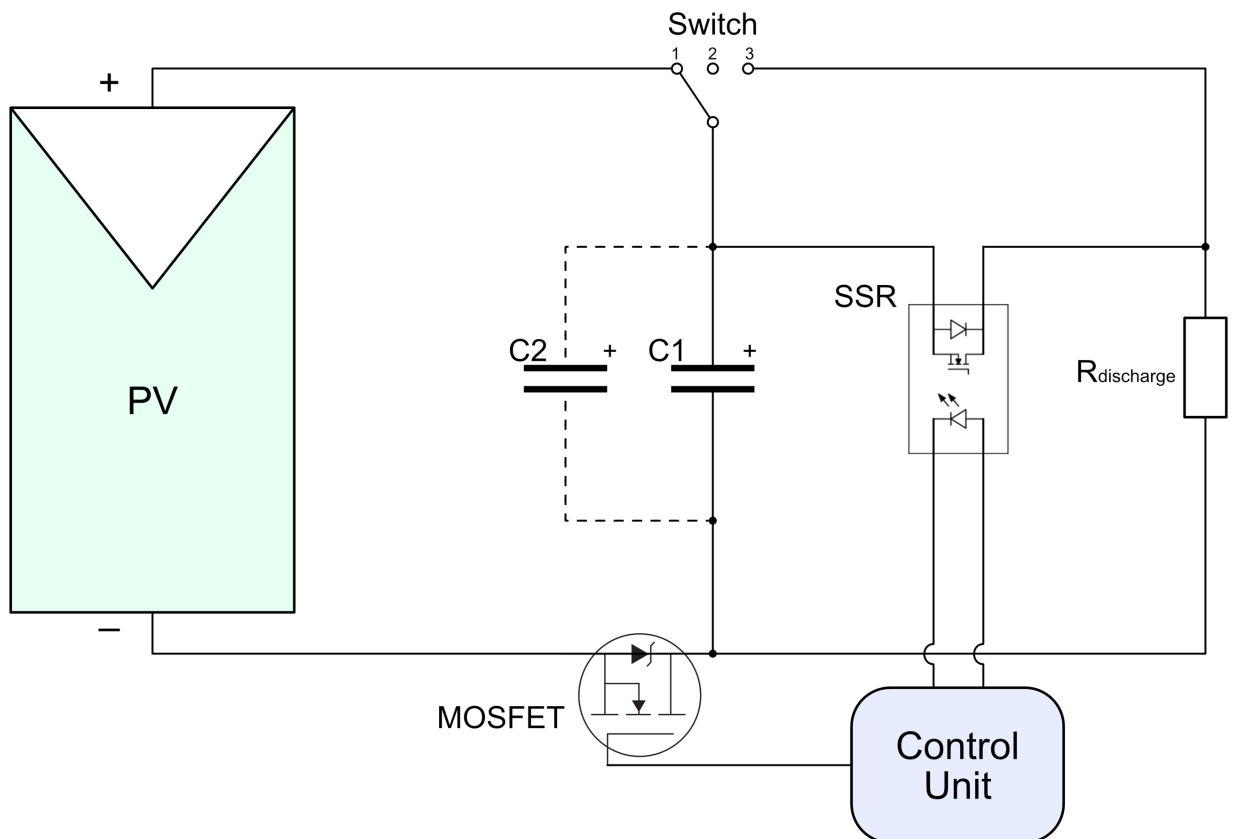


Рисунок 2.4 Схема з'єднання ємнісного навантаження

Важливою особливістю є реалізований автоматичний режим розряду конденсатора (див. розд. 2.7.2). На рис. 2.4 вказаний 3-позиційний перемикач відповідає за перемикання режимів роботи: 1 – готовність до вимірювання/автоматичний режим; 2 – режим простою; 3 – ручний режим розряду конденсатора. Подібна реалізація дозволяє використовувати як автоматичний режим розряду конденсатора, так і повністю ручний режим вимірювання (при умові замкнутого MOSFET) та розряду конденсатора за необхідності.

2.5 Організація вимірювальної складової

Під час вимірювання ВАХ ФМ критично важливо отримувати значення струму та напруги, що генерує ФМ, з високою точністю та частотою.

2.5.1 Аналого-цифровий перетворювач

Для виконання необхідних вимірювань напруги та струму обрано аналого-цифровий перетворювач ADS1256 [98] у вигляді плати розширення Raspberry Pi High-Precision AD/DA Expansion Board [99]. Даний модуль АЦП дозволяє підключити 8 вхідних аналогових сигналів, прецизійно оцифровуючи їх з 24-розрядною точністю і частотою оцифровки до 30кГц. Аналогові входи можна використовувати як 4 диференціальних аналогових входи. Джерело опорної напруги LM285 вбудоване, що забезпечує точність вимірювань незалежно від якості живлення модулю АЦП.

Важливою задачею є коректне налаштування максимальної частоти передачі даних шини SPI [100] на Raspberry Pi та швидкості вимірювання SPS на ADS1256. Для цього було виконано 45 тестових дослідів АЦП та визначено залежності кількості відліків та точності (Peak-to-Peak) від SPS і SPI (рис. 2.5).

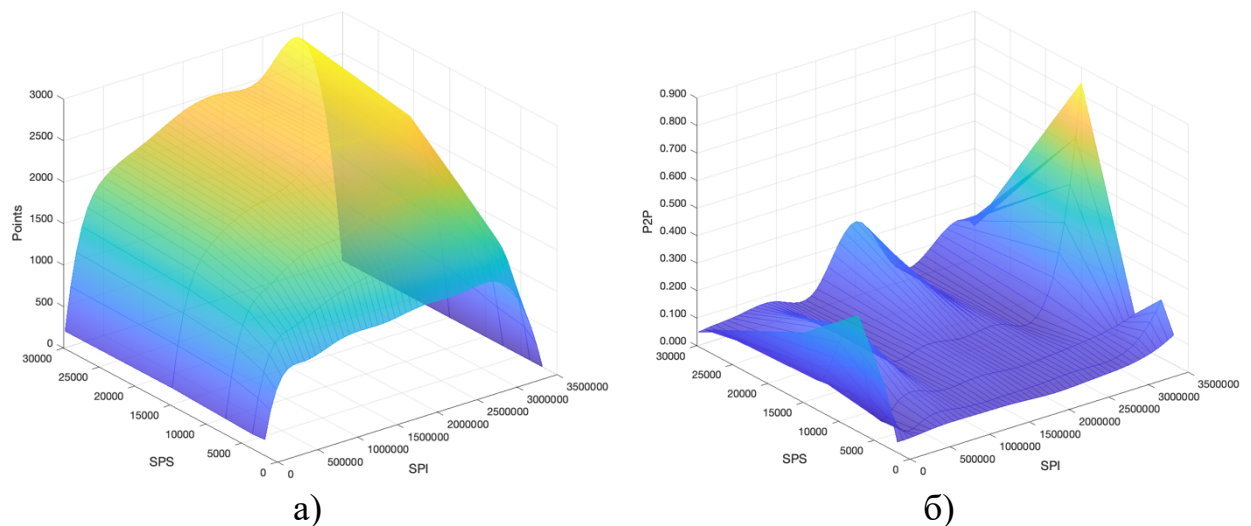


Рисунок 2.5 Визначення оптимальних налаштувань SPS та SPI

З огляду на необхідність отримування достатньої кількості відліків та їх достатньої точності, значення SPS обрано рівним 7500, зберігаючи заявлену роздільну здатність АЦП на рівні 17.7 біт. Значення SPI обрано 1935000, враховуючи вимоги до формату SPI. Такі налаштування дозволяють

отримувати до 2140 відліків на секунду з точністю nRMSE 0.014927 в тестових умовах. Обрані налаштування дозволяють отримати загальну точність системи близько $\pm 0.1\%$ під час вимірювання типового ВАХ з MPP 250 Вт, а кількість відліків близько 250 на криву. Вбудоване підсилення сигналу не використовується.

2.5.2 Вимірювання струму ФМ

Для вимірювання струму ФМ використано датчик постійного струму на ефекті Холла ACS713ELCTR-20A-T SOIC8 компанії Allegro [101]. Внутрішній опір становить 1,2 мОм, що забезпечує точне вимірювання в області КЗ. Загальна похибка на виході 1,5% при температурі 25 °С; діапазон вимірювального струму від 0 А до 20 А, вихідна чутливість дорівнює 185 мВ/А, час зростання вихідного сигналу складає 5 мкс. Після калібрування датчика за допомогою Keysight DSOX1102G [102] програмно задане зміщення вихідного сигналу складає 0.491 В.

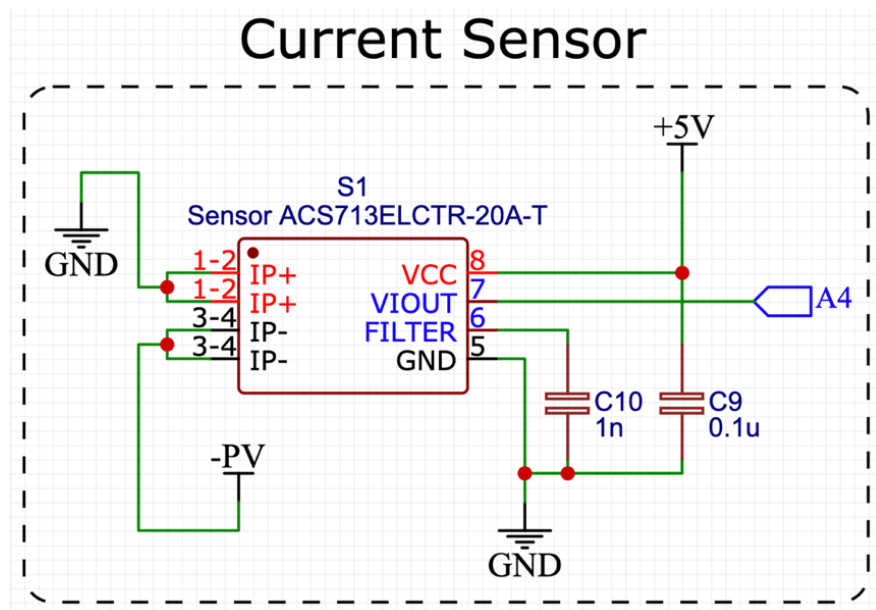
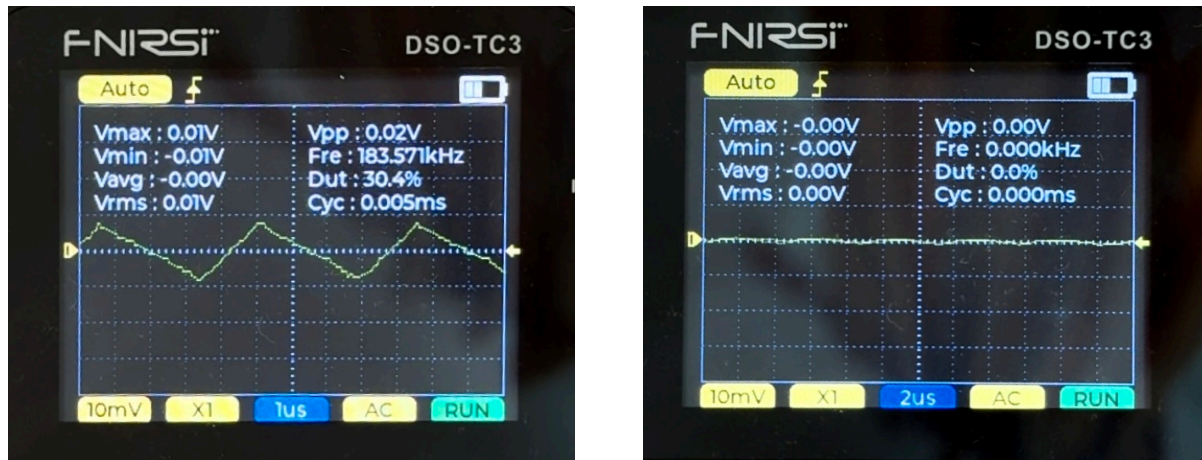


Рисунок 2.6 Підключення датчика струму ACS713 (C9 байпас, C10 фільтруючий)

Для правильної роботи даного датчика струму додатково використано два конденсатори – 0,1 мкФ байпас та 1 нФ фільтруючий конденсатор, що забезпечує згладжування пульсацій живлення та покращує відношення сигнал/шум. Загальну схему підключення датчика струму зображено на рис. 2.6.

Покази датчика струму ACS713 залежать від стабільності напруги живлення, тому для її додаткової реалізовано параметричний стабілізатор на стабілітроні BZX85-C5V1 YJ [103] з стабілізованою напругою 5,1 В.



а)

б)

Рисунок 2.7 Осцилограма напруги живлення датчика струму
а) без стабілізації, б) із стабілізацією

Після впровадження стабілізуючої схеми рівень шумів відчутно знизився (рис. 2.7)., що значно знижує вплив флуктуацій напруги живлення на результат вимірювання ВАХ ФМ.

2.5.3 Вимірювання напруги ФМ

Використаний АЦП вимірює напругу тільки в межах від 0 В до 3 В, тому для перетворення вимірюваної напруги ФМ використано резистивний дільник напруги.

Максимальна робоча напруга системи тестування складає 95 В, для покращення точності вимірювання одного ФМ реалізовано можливість вибору коефіцієнту дільника. Для вимірювання одного ФМ з максимально допустимою напругою XX 45 В обрано резистори з номіналами 147 кОм та 9,1 кОм.

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \frac{R_{D2}}{R_{D1} + R_{D2}} = 45 \text{ В} \frac{9.1 \text{ кОм}}{147 \text{ кОм} + 9.1 \text{ кОм}} = 2.623 \text{ В} \quad (2.11)$$

Вихідна напруга не перевищує 3 В, що відповідає параметрам АЦП.

$$I_{\text{діл}} = \frac{U_{\text{вих}}}{R_{D1} + R_{D2}} = \frac{45 \text{ В}}{147 \text{ кОм} + 9.1 \text{ кОм}} = 288,3 \text{ мкА} \quad (2.12)$$

Струм, що протікає через дільник, не перевищує 300 мкА, тому впливом дільника на роботу системи можна знехтувати.

$$K_{\text{діл}} = \frac{R_{D1}}{R_{D1} + R_{D2}} = \frac{9.1 \text{ кОм}}{147 \text{ кОм} + 9.1 \text{ кОм}} = 0.0583 \quad (2.13)$$

Коефіцієнт передачі обраного дільника складає 0.0583. Після калібрування дільника за допомогою Rohde&Schwarz HMC8012-G [104] програмно заданий коефіцієнт складає 0.05775.

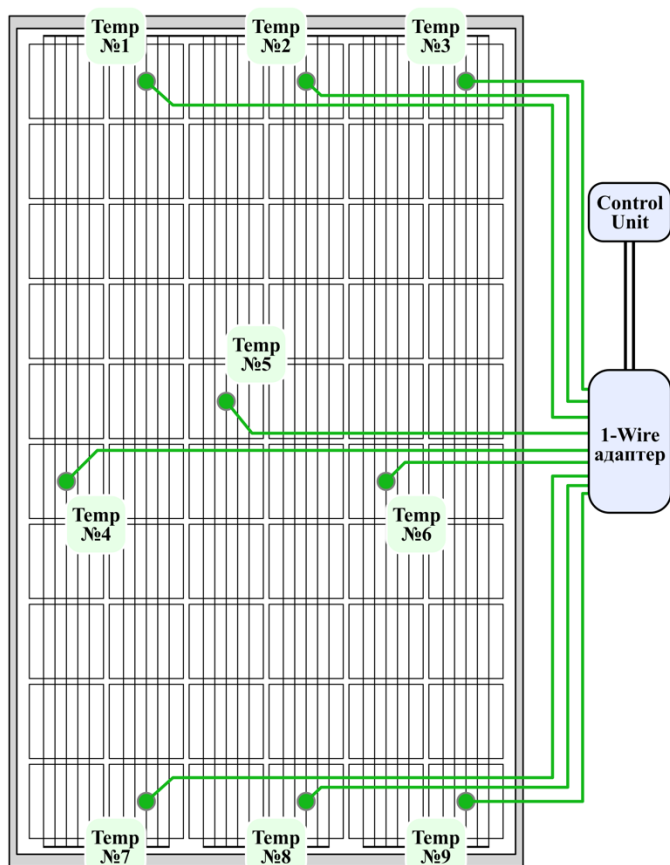
Для вимірювання декількох ФМ сумарною напругою ХХ не більше 95 В реалізовано можливість перемкнути на інший дільник з коефіцієнтом 0.02731.

2.5.4 Додаткові вимірювання

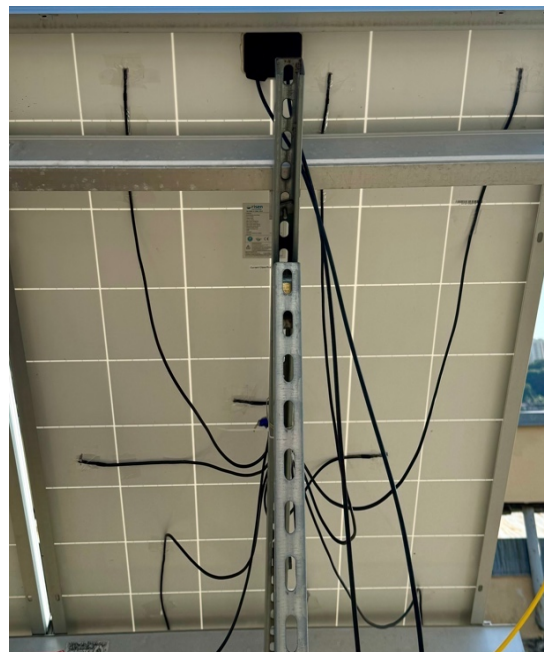
Серед основних сенсорів, що підключаються до системи, є датчики температури, вологості та рівня сонячної радіації.

Для вимірювання температури ФМ використано датчик температури DS18B20+ [105]. Він забезпечує вимірювання температури в діапазоні від -55 ° С до + 125 ° С з точністю від 9 до 12 бітів. В діапазоні від -10 ° С до + 85 ° С точність складає до ± 0.5 ° С. Підключається за допомогою інтерфейсу 1-Wire. Кожен DS18B20+ має унікальний 64-розрядний код, що дозволяє одночасне використання декількох датчиків.

Під час експериментальних вимірювань використано 9 датчиків DS18B20+ для вимірювання температури ФМ (рис. 2.8). Всі датчики було відкалібровано з досягненням рівномірності їх показів на рівні 0.2 ° С, на ФМ встановлено з використанням термопасти.



а



б

Рисунок 2.8 Розташування датчиків температури DS18B20+ на ФМ, схематичне зображення (а), фото (б)

Фіксація рівня сонячної радіації та її змін в часі під час вимірювань ВАХ ФМ реалізована підключенням зовнішнього піранометра Kipp&Zonpen SP-Lite 2 [106] . Даний піранометр вимірює сонячне випромінювання до 2000 Вт/м² в діапазонах спектру від 400 до 1100 нм з часом відгуку менше 1 секунди і чутливістю 81.38 мкВ/Вт/м². Точність складає менше 0,15%/°C (в межах від - 30 до + 70 °C).

2.6 Управління елементами системи вимірювання ВАХ ФМ

Керування режимом роботи навантажувальної частини здійснюється за допомогою розробленої плати управління, на якій розміщені силові ключі. Логічне управління силовими ключами та іншими вузлами системи виконується за допомогою розробленого програмного алгоритму, що виконується на мікрокомп'ютері.

2.6.1 Силова частина керування навантаженням

Силова частина є ключовим елементом плати управління та відповідає за комутацію ємнісного навантаження і синхронізацію вимірювань. З урахуванням вимог до напруги, струму та розмірів використано MOSFET-транзистори Infineon IRFB4510PBF [107] у кількості 8 штук. Дані транзистори дозволяються комутувати струм до 62 А максимальною напругою до 100 В, мінімальний опір у відкритому стані складає 10.7 мОм.

Керування MOSFET-транзисторами здійснюється драйвером IR4427SPBF [108], який забезпечує необхідний струм до 1.5 А і напругу до 20 В та дозволяє досягти високої швидкості комутації в 75 нс. Для стабільної роботи драйвера та транзисторів додано керамічний конденсатор ємністю 0,1 мкФ та електролітичний конденсатор ємністю 22 мкФ для згладжування пульсацій живлення та забезпечення стабільності напруги. Для обмеження струму затвора транзистора до 1.5 А застосовано резистор номіналом 11 Ом. Живлення драйверів та транзисторів відбувається безпосередньо від акумуляторів, що дозволяє отримати напругу у діапазоні від 12 В до 16,8 В, яка повністю відповідає вимогам роботи драйвера та транзисторів.

2.6.2 Проектування та виготовлення плати управління

Проектування друкованої плати управління відбувалось за допомогою сервісу EasyEDA [109], що містить в собі редактор електричних схем, spісе-симулятор і редактор друкованих плат.

Під час проектування друкованої плати управління враховані такі особливості їх розробки, як визначення необхідної товщини та ширини доріжок, визначення паразитних ємностей, організація земляного полігону тощо. Плата має 2 шари товщиною міді 35 мкм кожен, загальна товщина плати управління складає 1,5 мм.

Плата управління виступає центральною частиною в комунікації всіх компонентів системи, тому на платі використовуються роз'єми різного типу для підключення таких елементів, як шлейф GPIO від мікрокомп'ютера, внутрішні та зовнішні аналогові та цифрові датчики, аналогові входи АЦП,

інтерфейси 1-Wire та I2C, живлення від акумуляторів з подальшим розподілом до інших компонентів системи, тощо. Виготовлено дану плату на сервісі з експрес виробництва друкованих плат PCB24 [110] в м. Львів, Україна.

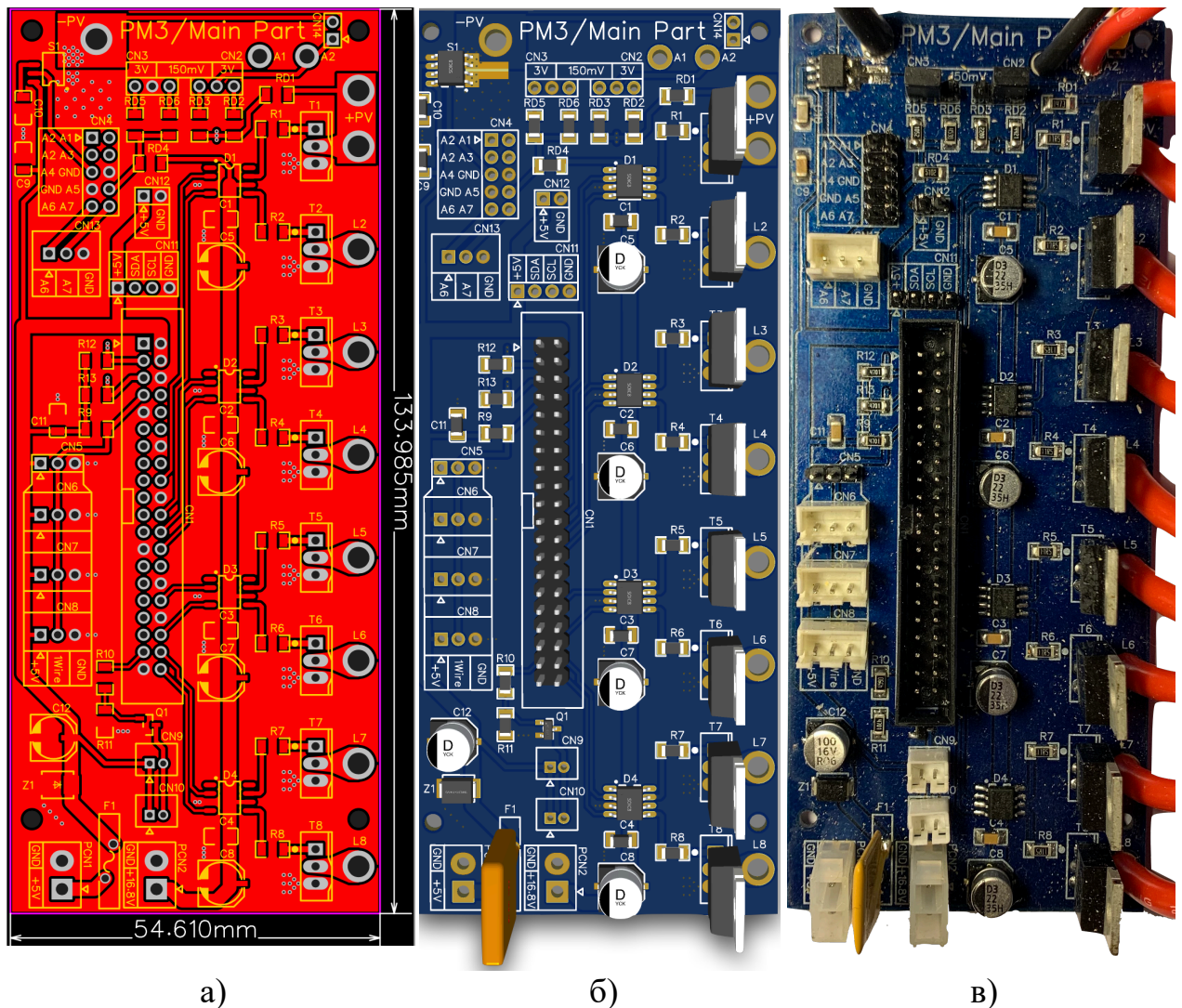


Рисунок 2.9 Друкована плата управління
а) проектування в EasyEDA, б) 3Д-модель, в) фото зібраної плати

Вигляд плати управління під час проектування зображено на рис. 2.9 а), 3Д-модель плати управління разом з частково змонтованими елементами зображено на рис. 2.9 б), реальне зображення готової плати разом з усіма змонтованими елементами показано на рис. 2.9 в). Вигляд системи зображено в [Додаток Б].

2.6.3 Мікрокомп'ютер

Виконання алгоритму керування та розробленого програмного забезпечення для екстракції характеристик ФМ здійснюється на основі одноплатного мікрокомп'ютера Raspberry Pi 4 Model B [111]. Він побудований на основі системи на кристалі SoC BCM2711 в якій використаний 4-х ядерний процесор ARM Cortex-A72 з тактовою частотою 1,5 ГГц., підтримує Wi-Fi версії 802.11ac та Bluetooth версії 5.0. На мікрокомп'ютері використовується спеціалізований дистрибутив Linux Raspbian OS.

Для приєднання та управління зовнішніми платами, датчиками та іншими елементами системи даний мікрокомп'ютер має 40 GPIO (general purposed input-output – універсальний вхід-вихід), що реалізують передачу даних за допомогою інтерфейсів SPI, I2C, 1-wire, UART, а також управління через дискретний сигнал 3.3 В та підтримують ШИМ-модуляцію.

В якості системи вводу-виводу інформації обрано 7 дюймовий сенсорний TFT екран [112] роздільною здатністю 800 на 480 пікселів, живлення якого здійснюється напругою 5В. Даний екран офіційно підтримується обраним мікрокомп'ютером Raspberry Pi та дозволяє в зручному форматі керувати процесом вимірювання ВАХ і отримувати результати у вигляді таблиць та графіків в інтерфейсі користувача.

2.6.4 Алгоритм керування та програмне забезпечення

Керування усіма апаратними компонентами, виконання обробки отриманої інформації, проведення необхідних розрахунків та екстракція характеристик ФМ, вивід отриманих результатів виконується за допомогою розробленого програмного забезпечення [Додаток Г, Додаток Д]. Мовою програмування обрано Python – інтерпретована об'єктно-орієнтована мова програмування високого рівня зі строгою динамічною типізацією [113].

Розроблене програмне забезпечення базується на принципі модульної архітектури, що забезпечує незалежну розробку окремих компонентів системи, які можуть функціонувати автономно або взаємодіяти між собою. Такий підхід дозволяє підвищити стабільність коду, спрощує тестування та налагодження

окремих модулів, а також забезпечує гнучкість у їх використанні. Зокрема, функція для тестування ФМ може бути виконана через інтерфейс користувача, шляхом імпорту модуля як бібліотеки, через командний рядок або з віддаленого пристрою за допомогою серверного модуля.

Програмне забезпечення складається з декількох ключових модулів: основного системного модуля `PrystriyOS.py`, модуля графічного інтерфейсу `Prystriy_UI.py` [Додаток Г], модуля основних функцій `Prystriy_functions.py` [Додаток Д], модуля керування даними `Prystriy_data.py`, модуля роботи АЦП `ADS1256.py`. На рис. 2.10 зображено блок-схему алгоритму керування з зазначеними функціями, що використовуються.

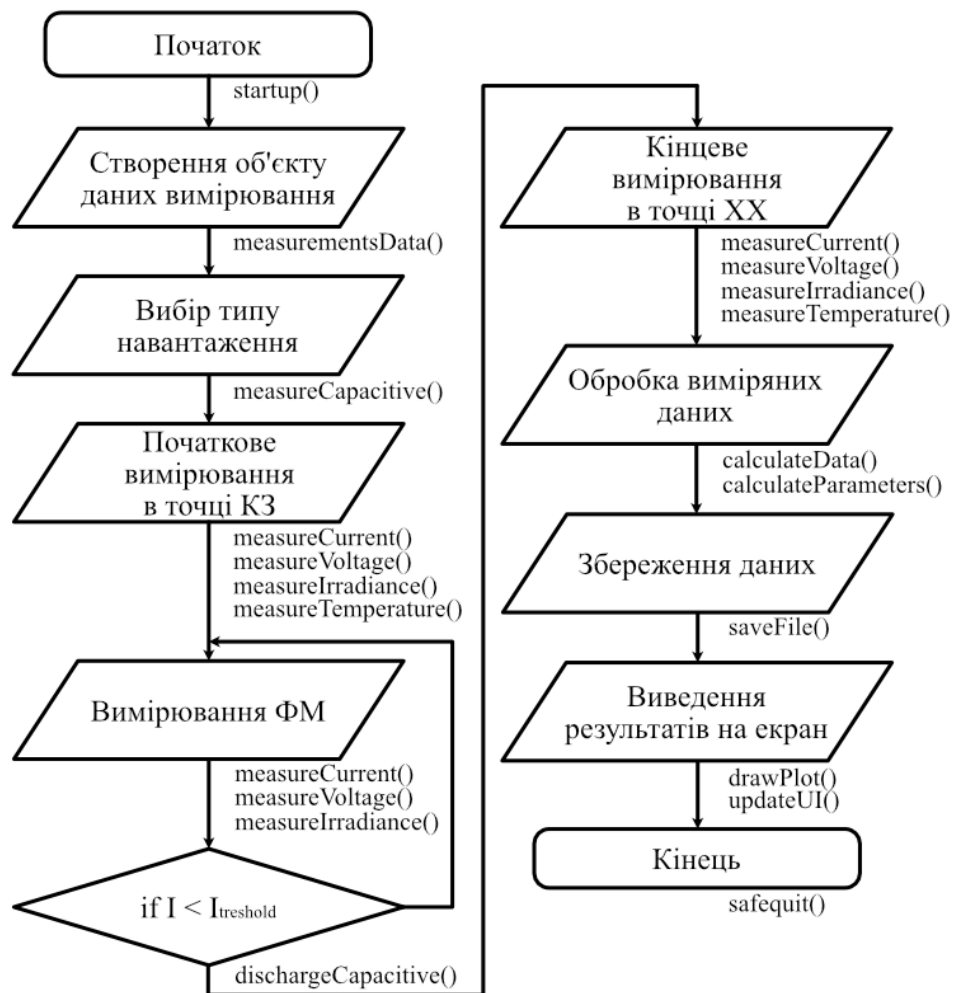


Рисунок 2.10 Блок-схема алгоритму керування

Під час запуску програмного забезпечення відбувається базові налаштування та вибір режимів роботи GPIO. На початку вимірювання ФМ створюється об'єкт, який містить інформацію про дату й час проведення

вимірювання, виміряні значення струму та напруги, розраховану потужність, параметри ФМ, а також дані про температуру ФМ та сонячну радіацію, якщо відповідні сенсори підключені до системи. Відбувається початкове вимірювання даних в точці КЗ. Вимірювати температуру ФМ доступно один чи два рази за вимір через високу інертність.

Наступним етапом є безпосередньо вимірювання ВАХ ФМ – програмний алгоритм за допомогою керування транзисторами комутує ємнісне навантаження на ФМ, що призводить до зарядку конденсатора від ФМ. Під час проходження заряду відбувається вимірювання струму, напруги та рівня сонячної радіації. Після досягнення заданого граничного значення струму відбувається від'єднання ємнісного навантаження від ФМ та початок автоматичного розряду конденсаторів. В подальшому програмне забезпечення здійснює обробку отриманих експериментальних даних, проводить розрахунки параметрів ФМ, створення та відображення графіку ВАХ, збереження даних.

Взаємодія з програмним забезпеченням відбувається через розроблений користувацький інтерфейс (рис. 2.11), що використовує можливості раніше обраного сенсорного екрану.

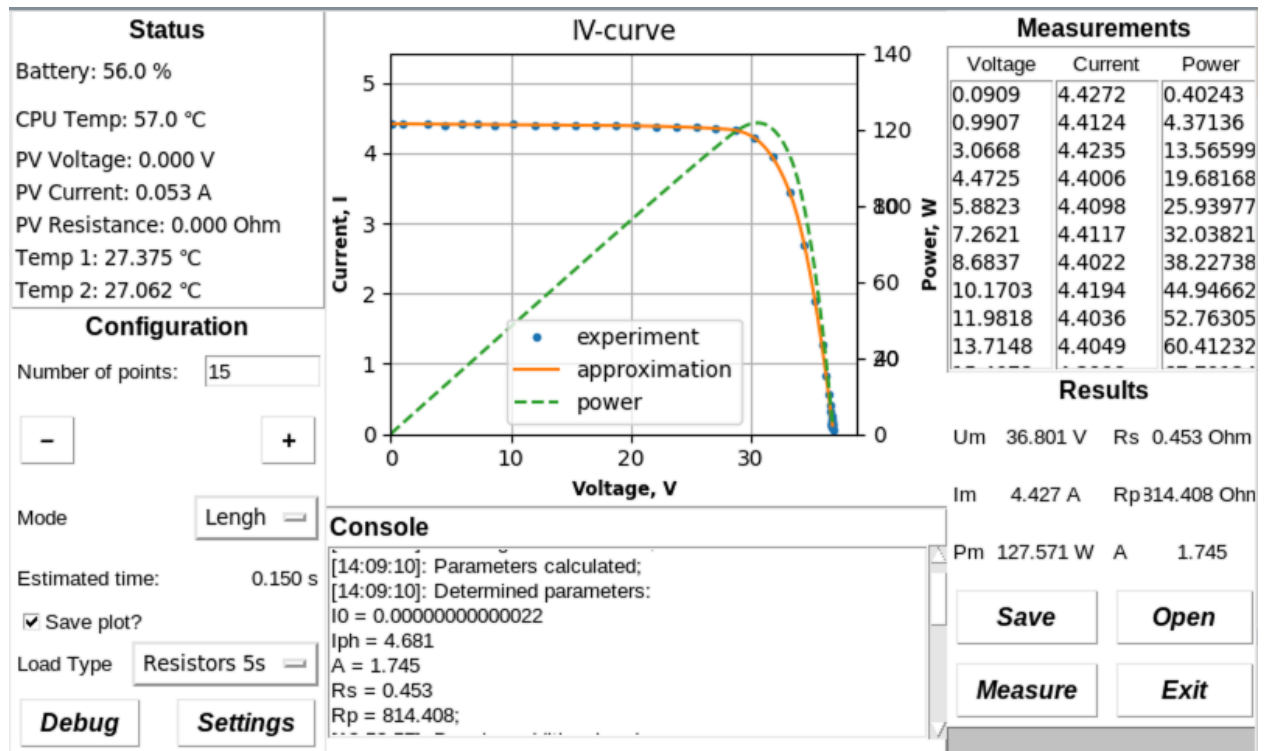


Рисунок 2.11 Розроблений користувацький інтерфейс

Інтерфейс розроблено за допомогою інтерфейсного пакету Tkinter – багатоплатформна графічна бібліотека інтерфейсів на основі засобів Tk. Бібліотека Tkinter не реалізує власний інтерфейс до бібліотеки Tk, а забезпечує конвертування звернень Python в звернення Tcl — мови, яка тісно інтегрована з Tk. Таким чином Tkinter є обгорткою для Tcl/Tk.

2.7 Інші особливості вимірювальної системи

Вимірювальна система містить більше 80 різних компонентів, кожен з яких підібрано під дану систему з урахуванням необхідної якості вимірювань, компактності, сумісності з мікрокомп'ютером Raspberry Pi, низької вартості. До інших основних частин системи можна віднести автономне живлення, реалізація автоматичних та віддалених вимірювань, інтерфейси передачі даних, захист та охолодження.

2.7.1 Автономне живлення

З огляду на необхідність проводити вимірювання ВАХ ФМ в польових умовах реалізовано автономне живлення для забезпечення роботоздатності без доступу до стаціонарних джерел електроенергії.

Загальна потужність споживання вимірювальної системи складає до 6 Вт, орієнтовний час автономної роботи складає 8 годин. Для забезпечення таких умов необхідно обрати акумулятор з ємністю не менше 45 Вт·год. Додатково враховано необхідність забезпечення стабільної напруги 5 В для логічної частини системи та напруги понад 10 В для силової частини, з можливістю пікового струму понад 6 А.

Як основне джерело живлення обрано чотири літій-іонні акумулятори Samsung 29E [114] типорозміру 18650, що мають номінальну ємність 2900 мА·г та номінальну напругу 3,7 В. Акумулятори з'єднані послідовно, мають номінальну напругу 14,8 В, максимальний струм понад 8 А та загальну ємність 43 Вт·год. Використано BMS-контролер моделі 4S 20A HX-4S-D20 [115], який забезпечує моніторинг стану акумуляторів та їх захист. Для усунення розбалансування застосовано пасивний метод балансування за допомогою резистивного модуля балансування.

Зниження та стабілізація живлення системи на рівні 5.1 В реалізовується понижуючим DC-DC перетворювачем XL4016 потужністю 100 Вт [116]. Даний перетворювач має широкий діапазон вхідної напруги (від 9 В до 35 В) та забезпечує стабільну вихідну напругу 5 В при максимальному вихідному струмі до 9 А. Наявний високий запас вихідного струму дозволяє зменшити «зашумленість» сигналу при робочих струмах, що підтверджується перевіркою осцилографом чотирьох різних перетворювачів під навантаженням.

2.7.2 Автоматичні та віддалені вимірювання

Для розширення області застосування вимірювальної системи додано можливість проводити автоматичні та/або віддалені вимірювання ВАХ ФМ без участі оператора системи.

Мікрокомп'ютер Raspberry Pi не має вбудованого годинника реального часу, тому для синхронізації часу в системі використано модуль годинника реального часу DS3231M [117]. Даний модуль приєднується за допомогою інтерфейсу I2C, має вбудований LiPo акумулятор і забезпечує точність ходу годинника: $\pm 5 \text{ ppm}$ ($\pm 0.432 \text{ с/добу}$).

Автоматичний режим вимірювання потребує можливості програмно запускати розряджання ємнісного навантаження. Для цього програмне забезпечення керуючи MOSFET-транзистором від'єднує ФМ від навантаження і подаючи сигнал на увімкнення SSR (solid state relay) комутує конденсатор з резистором. Після програмно заданої затримки часу розряду SSR вимикається і система знову готова до проведення нового виміру. Разом з автономним живленням (див. розділ 2.7.1) такий підхід дозволяє отримати повністю автоматичний та автономний режим роботи вимірювальної системи з неперервним процесом вимірювання ВАХ. Присутня можливість вибору кількості автоматичних вимірів або задання часових меж для їх проведення. Для забезпечення чіткої

Віддалений режим роботи системи в поєднанні з автоматичним режимом вимірювання дозволяє проводити велику кількість вимірювань ВАХ ФМ впродовж визначеного часу без необхідності присутності оператора. Віддалене

керування реалізується підключенням системи до мобільного інтернет зв'язку з подальшим використанням ПО для віддаленого доступу до екрану (наприклад, TeamViewer [118]) або до командного рядка системи (наприклад, протокол SSH [119]). Для доступу до системи вимірювання через інтернет зв'язок використовується OpenVPN [120] для створення шифрованих з'єднань між клієнтами.

2.7.3 Інтерфейси передачі даних

В даній вимірювальній системі реалізовано трипровідну схему інтерфейсу 1-Wire [121], наявні два внутрішні підключення та одне зовнішнє. Передача даних здійснюється в асинхронному напівдуплексному режимі з максимальною швидкістю 16,3 кбіт/с. Система виконує роль ведучого, тоді як периферійні пристрої працюють як ведені, реагуючи на команди ведучого. Для забезпечення стабільної роботи шини 1-Wire лінія даних підтягнута до живлення за допомогою резистора номіналом 4,7 кОм. Додатково використано байпас-конденсатор ємністю 0,1 мкФ для згладжування пульсацій живлення і стабільної роботи пристроїв.

Також реалізовано інтерфейс I2C з дволінійною шиною передачі даних, що використовує послідовну лінію даних SDA та лінію тактування SCL, наявні два внутрішні підключення. Для коректної роботи I2C обидві лінії підтягнуті до живлення за допомогою резисторів номіналом 4,7 кОм.

Додатково присутня можливість зовнішнього та внутрішнього підключення аналогових датчиків завдяки використанню АЦП.

2.7.4 Електричний захист та додаткове охолодження

Електричний захист та система охолодження є важливими елементами для забезпечення надійності, відмовостійкості та безпечної роботи системи вимірювання.

Для захисту від КЗ використано самовідновлюваний запобіжник Littelfuse PolySwitch 30R400UF [122], який забезпечує робочий струм 4 А та здатний витримувати струми до 40 А. Принцип дії запобіжника базується на збільшенні опору при перевищенні струму через нагрів полімерного матеріалу.

Після усунення КЗ запобіжник охолоджується і повертається до початкового стану.

Захист від перенапруги забезпечується за допомогою TVS-діода ST SMBJ5.0A-TR [123], який спрацьовує при напрузі вище 6,4 В, обмежуючи її рівень та відводячи надлишковий струм. Діод характеризується максимальною потужністю розсіювання 600 Вт та малим струмом витоку 50 мкА. Принцип роботи TVS-діода полягає у «лавинному пробії», який миттєво знижує внутрішній опір при виникненні перенапруги, захищаючи тим самим основні елементи системи. Завдяки високій швидкості реакції діод забезпечує ефективний захист при короткочасних імпульсах перенапруги.

Враховуючи можливий нагрів навантажувальних частин, мікрокомп'ютера та інших компонентів, для підтримання стабільної роботи системи реалізовано систему охолодження на основі двох безщіткових вентиляторів, що забезпечують повітряний потік 0,05 м³/хв при струмі споживання 0.1 А. Керування системою охолодження реалізовано за допомогою MOSFET-транзистора IRLML6244TRPBF [124] з відповідною обв'язкою.

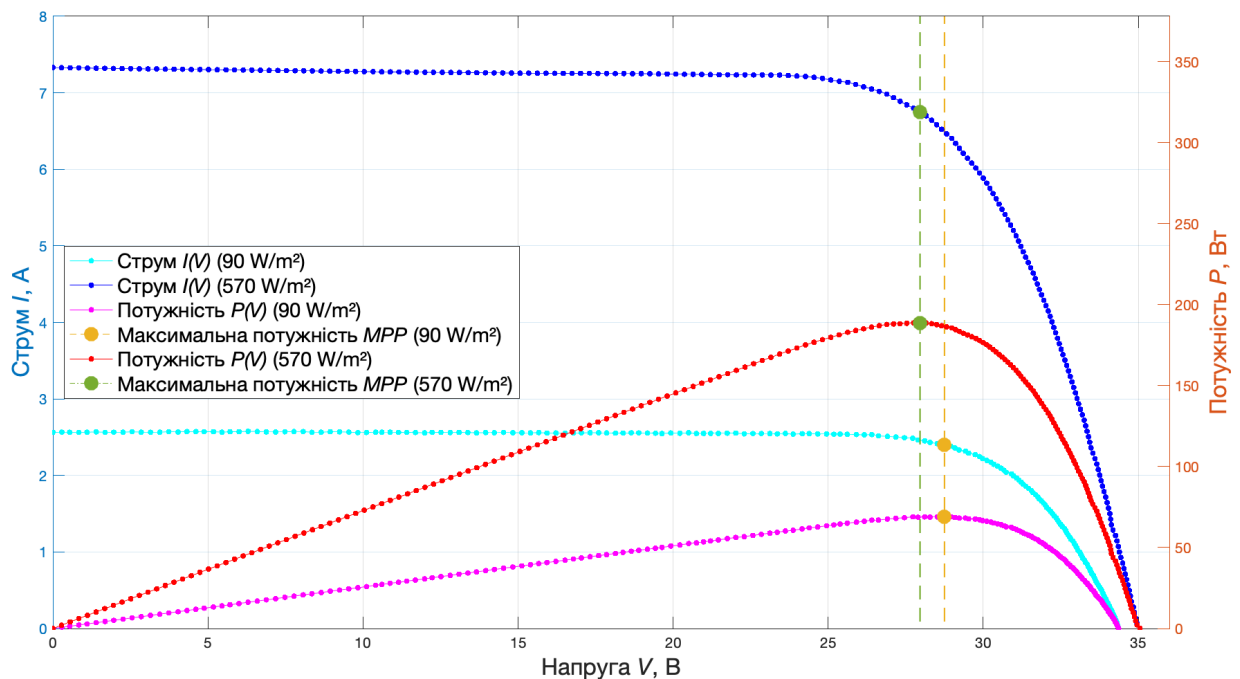
2.8 Вимірювання ВАХ ФМ в польових умовах

Робочі характеристики ФМ досліджувалися в реальних польових умовах з використанням розробленої системи вимірювання ВАХ ФМ. Під час експериментальних досліджень для проведення вимірів ВАХ використовувався монокристалічний модуль Risen RSM60-6-280P [125] максимальною потужністю 280 Вт. Конструктивно ФМ складається із 60 ФЕК з'єднаних послідовно з трьома шунтувальними діодами. Даний ФМ встановлено в портретній орієнтації, орієнтований на південь з кутом нахилу $\beta = 35$, на металевому каркасі на даху 20-го корпусу ФЕА НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», де і проводились експериментальні дослідження. Основні паспортні технічні дані даного ФМ, визначені при STC, наведені в табл. 2.1.

**Таблиця 2.1 — Паспортні технічні
характеристики ФМ Risen RSM280P**

Модель ФМ	Risen RSM60-6-280P
Максимальна потужність, $Вт$	280
Напруга ХХ, $В$	38.3
Струм КЗ, $А$	9.4
Напруга МРР, $В$	31.5
Струм МРР, $А$	8.9
ККД, %	17.1

У результаті проведених експериментальних досліджень на ФМ Risen RSM280P зібрано та проаналізовано більше 1000 вимірів ВАХ. Виміри включали одразу визначення базових параметрів, таких як МРР, рівень сонячної радіації, струм КЗ, напругу ХХ, а також температуру ФМ і тривалість вимірювання. Приклад ВАХ ФМ при низькому та високому рівнях сонячної радіації відображено на рис. 2.12.



**Рисунок 2.12 Приклади отриманих ВАХ ФМ
при різних рівнях сонячної радіації**

Використання ємнісного методу вимірювання в основі розробленої системи дозволяє також отримувати якісні ВАХ при роботі ФМ в умовах

часткового затінення різної інтенсивності. Приклад ВАХ затіненого ФМ зображено на рис. 2.13.

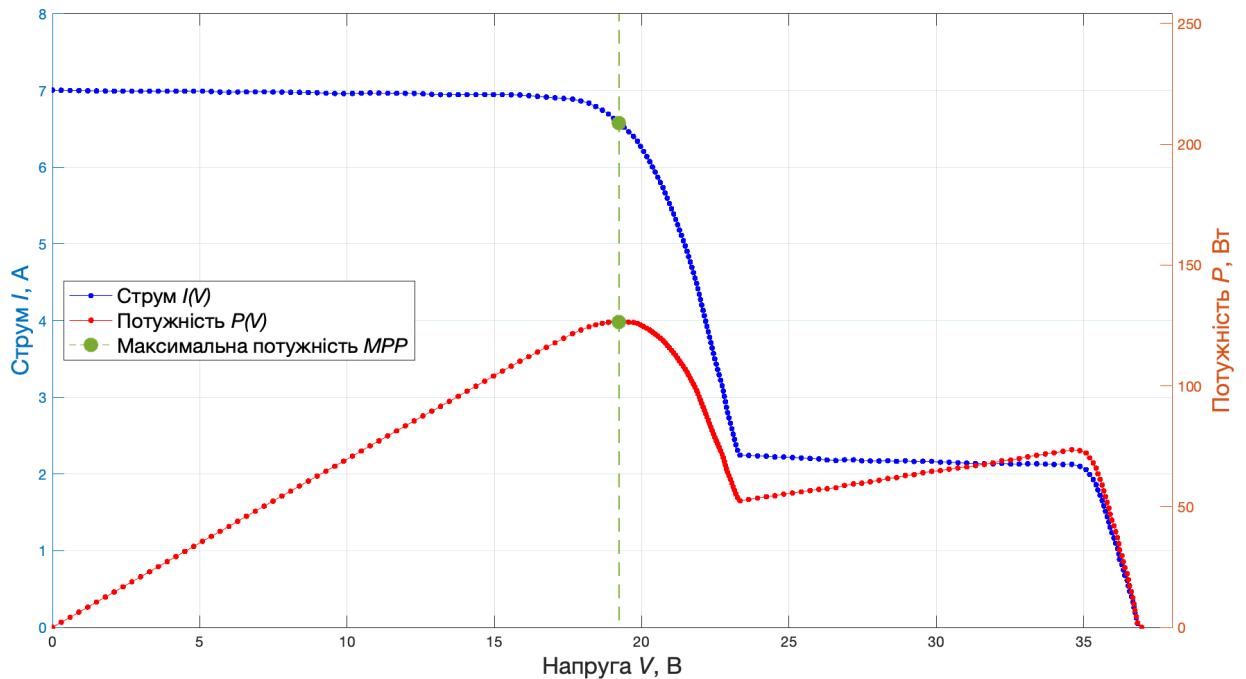


Рисунок 2.13 Приклад отриманої ВАХ затіненого ФМ

За результатами усіх вимірювань мінімальна потужність склала 6 Вт, максимальна – 264 Вт. Сонячна радіація варіювалася від 50 Вт/м² до 902 Вт/м². Мінімальний струм КЗ становив 0.3 А, максимальний досягнув 11 А. Напруга ХХ знаходилася в діапазоні від 31.2 В до 37.3 В. Температура ФМ варіювалася від 15.5 °С до 59.1 °С.

За низьких значень сонячної радіації, зокрема при 50 Вт/м², потужність значно знизилась і не перевищила 10-15 Вт, струм КЗ зменшився до 0.3-0.6 А, а напруга ХХ залишилась у межах 31-33 В. При зростанні сонячної радіації до максимальних значень близько 902 Вт/м², спостерігається значне збільшення вихідної потужності до 261 Вт, струму КЗ до 11 А та напруги ХХ до 37.2 В.

За високих температур (понад 45 °С) максимально можлива потужність ФМ знижується. Наприклад, за сонячної радіації 562 Вт/м² та температури 44.21 °С потужність склала 165 Вт, тоді як за подібної іррадіації та нижчої температури (30.5 °С) потужність зросла до 177 Вт. Залежність максимуму потужності ФМ від температури та рівня сонячної радіації оцінено на рис. 2.14.

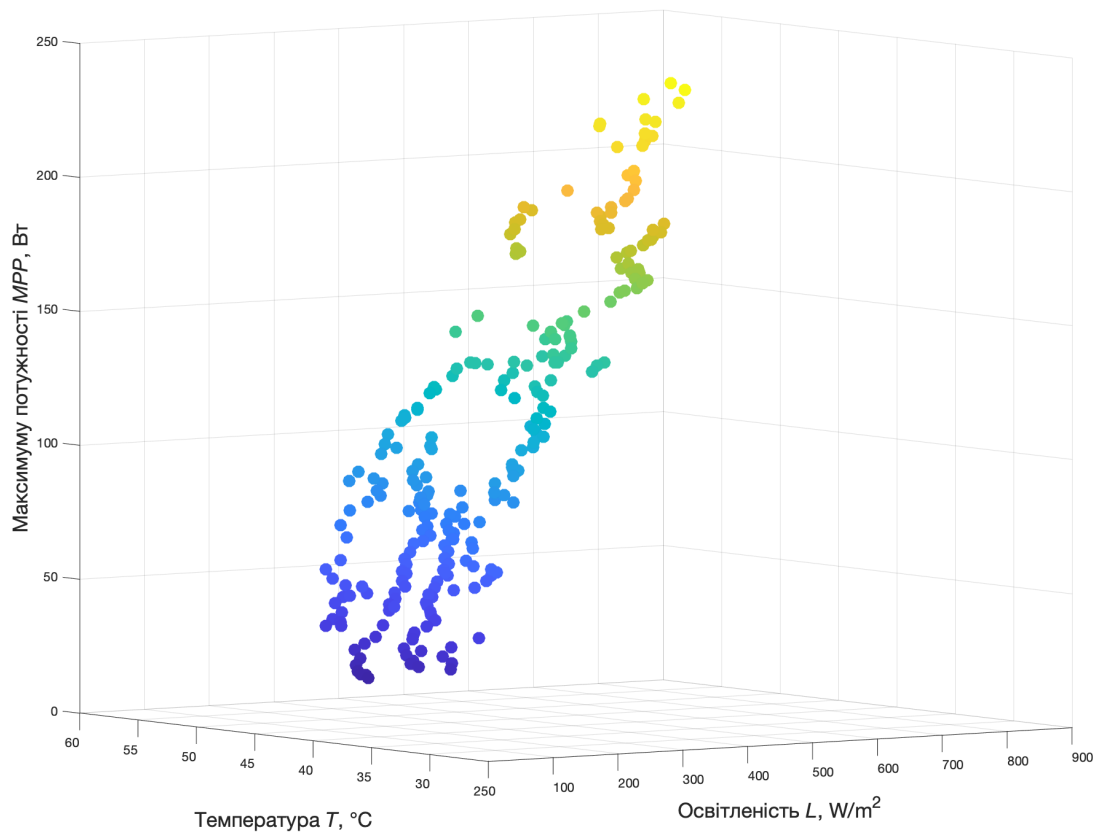


Рисунок 2.14 Вплив температури та сонячної радіації на максимум потужності

Додатково за допомогою створеної системи проводились вимірювання ВАХ монокристалічних ФМ Kvaazar KV-100 потужністю 100 Вт [126], SunRise SR- M536100 потужністю 100 Вт [127], а також двостороннього ФМ JA Solar JAM72D30-555 потужністю 555 Вт [128], порівняння ВАХ в різних режимах роботи якого відображено на рис. 2.15.

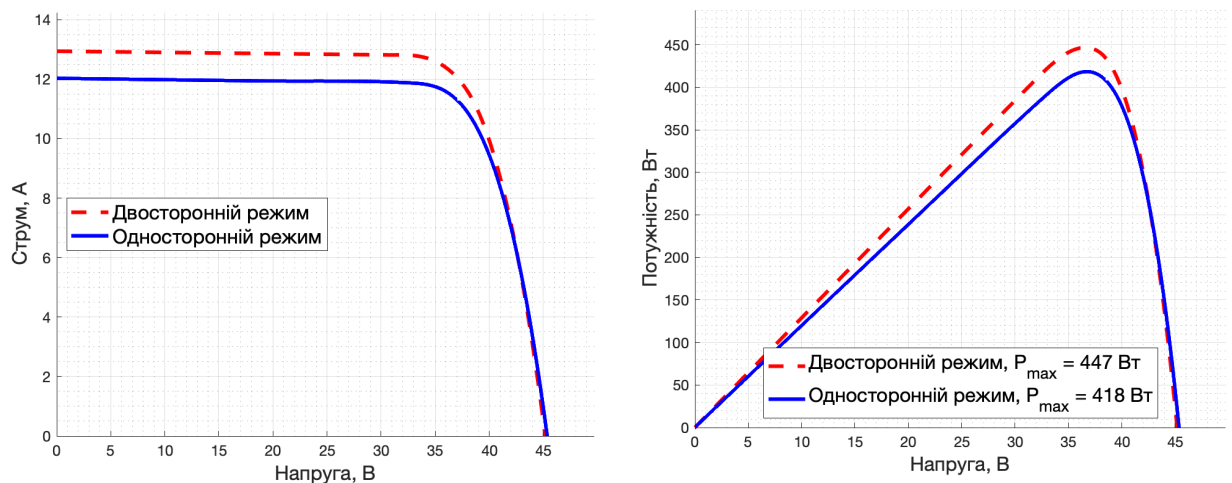


Рисунок 2.15 Порівняння режимів роботи двостороннього ФМ

Тривалість одного вимірювання ВАХ коливалась від 190 мс. до 2.5 с. в залежності від рівня сонячної радіації та конфігурації навантаження. Залежність часу виміру ВАХ від струму КЗ на основі обраних 700 експериментальних вимірів зображено на рис. 2.16.

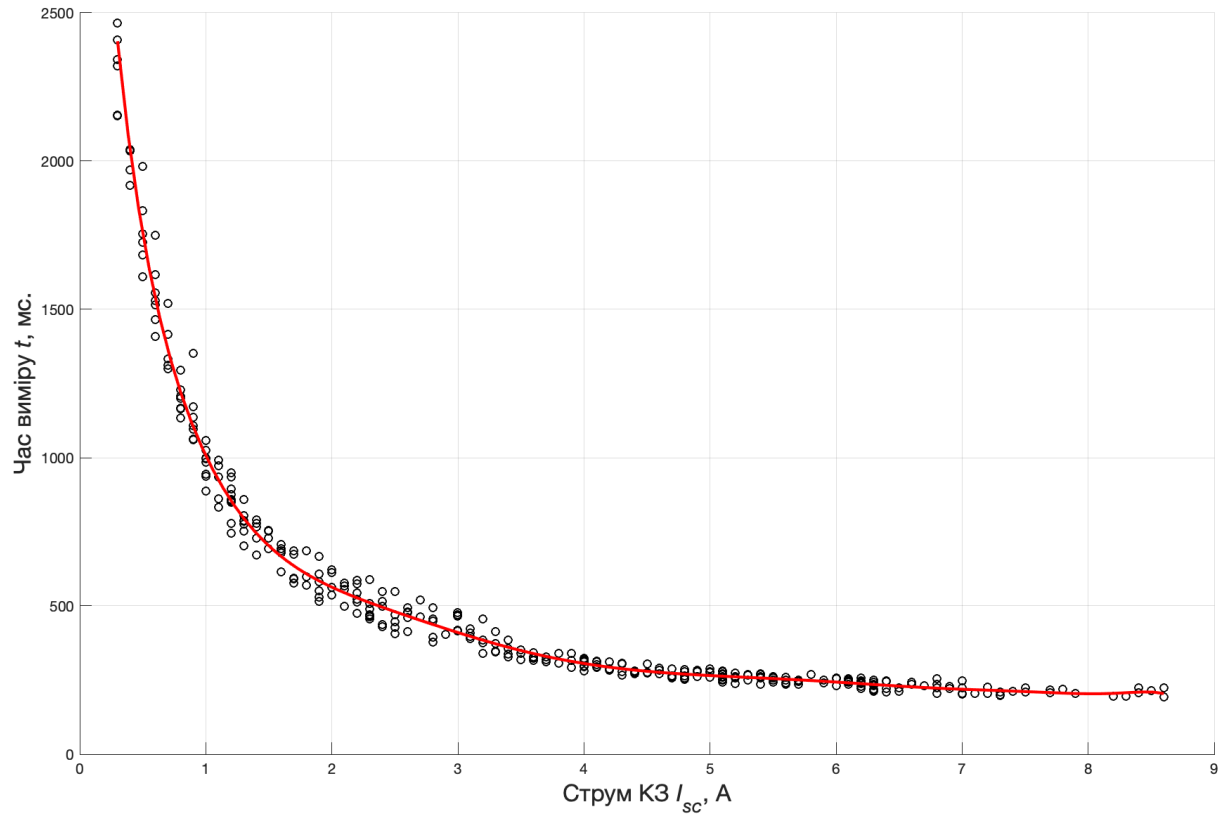


Рисунок 2.16 Час виміру ВАХ ФМ в залежності від струму КЗ

Результати експериментальних досліджень підтверджують відомі залежності базових вихідних характеристик ФМ від рівня сонячної радіації та температури. Отримані експериментальні дані відповідають необхідній точності, дозволяють оцінити роботу ФМ за різних умов та слугують основою для подальшого аналізу та екстракції параметрів ФМ.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОМОДУЛІВ

3.1 Комплексний алгоритм фільтрації та апроксимації

експериментальних даних ВАХ ФМ

Програмне забезпечення для обробки експериментальних результатів вимірювання вольт-амперних характеристик ФМ є необхідним інструментом для виділення надійної інформації з експериментальних даних. На відміну від програмної симуляції ВАХ ФМ, реальні експериментальні дані можуть бути частково чи повністю спотворені наявною похибкою вимірювання та/або зміною навколишніх умов під час тестування ФМ, що призводить до появи шумів та викривлення отриманих експериментальних результатів. Перед подальшим аналізом та проведенням розрахунків на їх основі такі результати потребують попередньої програмної обробки. Основні етапи програмної обробки експериментальних даних зосереджені на очищенні від аномальних значень, рівномірному розподілі точок та згладжуванні результатів для покращення точності подальшого аналізу.

Графік ВАХ ФМ в загальному вигляді представлений функцією залежності струму від напруги $I(V)$. В обраній області визначення функції в рамках першого квадранту ВАХ ФМ є аперіодичною неперервною монотонною експоненціально спадною функцією. Враховуючи дані властивості функції $I(V)$ та необхідність збереження фізично коректного вигляду графіку, що відповідатиме реальним процесам в ФЕК, задача попередньої обробки не може бути реалізована наявними підходами та методами. Наприклад, поширений метод поліноміальної апроксимації у випадку застосування до ВАХ ФМ вимагає високого ступеня поліному та в результаті призводить до отримання кривої, що не відповідає реальним процесам в ФЕК і не може бути використаною для подальших розрахунків через її неприродню поведінку (рис. 3.2).

Для вирішення задачі обробки експериментальних даних розроблено новий комплексний алгоритм фільтрації та апроксимації даних, що враховує

вищевказані особливості поведінки функції ВАХ ФМ на заданій області визначення.

3.1.1 Підготовка вхідних даних та видалення дублікатів

На початковому етапі дані зчитуються у вигляді двох векторів ($V = [V_1, V_2, \dots, V_n]$) для напруги та ($I = [I_1, I_2, \dots, I_n]$) для струму. Під час зняття ВАХ ФМ в польових умовах через особливості роботи розробленої системи тестування та значну кількість вимірних відліків можуть виникати дублікати напруги з різними значеннями струму.

Розроблена програмна функція *cldata.m* [Додаток Е] усуває дублікати шляхом усереднення струму для однакових послідовних значень напруги з подальшим видаленням зайвих дублікатів.

Нехай ($V_i = V_{i+1} = V_{i+2} = \dots = V_{i+k}$), тоді усереднене значення струму визначається як:

$$I_{\text{avg}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k I_i, \quad (3.1)$$

де k – кількість відліків з однаковими V_i .

Розраховане значення I_{avg} записується в I_i , зайві пари значень видаляються, отримані результати сортуються за зростанням напруги.

3.1.2 Медіанна фільтрація даних на основі критерію медіанного абсолютного відхилення залишків

Для ефективного усунення аномальних значень з врахуванням особливостей поведінки ВАХ розроблено функцію *delot.m* [Додаток Ж], що використовує одновимірний медіанний фільтр у поєднанні з медіанним абсолютним відхиленням залишків як критерієм виявлення аномалій. Цей метод є стійким до наявності викидів у вихідних даних, оскільки медіана є більш робастним статистичним показником порівняно із середнім значенням.

На першому етапі для кожної точки I_i обчислюється локальне медіанне значення \widetilde{I}_W , яке розраховується у ковзному вікні W . Через нерівномірний розподіл значень вздовж кривої ВАХ після тестування ФМ ширина ковзного

вікна адаптується для кожного набору даних і дорівнює кількості пар значень поточного ВАХ в емпірично визначеному діапазоні напруги від 10 до 14 В. Ковзне вікно включає k сусідніх точок навколо точки I_i :

$$\widetilde{I}_W = \text{median}(I_{j \in W}), \quad (3.2)$$

де $W = \{I_{i-(k-1)/2}, \dots, I_{i+(k+1)/2}\}$.

Залишки R_i в цьому алгоритмі визначаються для кожної точки різницею між експериментально вимірним значенням струму I_i та його локальним медіанним значенням \widetilde{I}_W :

$$R_i = |I_i - \widetilde{I}_W|. \quad (3.3)$$

На основі усіх залишків R_i для кожного вікна та їх медіанного значення \tilde{R} обчислюється медіанне абсолютне відхилення, яке є робастною мірою розсіювання даних:

$$MAD(R) = \text{median}(|R_i - \tilde{R}|) \quad (3.4)$$

Щоб визначити, чи є певна точка I_i аномальною, залишок R_i в цій точці порівнюється з масштабованим медіанним абсолютним відхилення залишків \tilde{R} . Критерій виявлення аномалій має вигляд:

$$R_i > \alpha \cdot MAD(R), \quad (3.5)$$

де α – масштабний коефіцієнт, що задає поріг чутливості до викидів, за замовчуванням дорівнює 2.

Усі точки I_i , що задовольняють умову $R_i > \alpha \cdot MAD(R)$, видаляються з даних. Даний підхід дозволяє усунути аномальні значення струму, які суттєво відрізняються від локального тренду.

Важливою складовою розробленого підходу є врахування граничних областей ВАХ. Описана вище медіанна фільтрація даних на основі критерію медіанного абсолютного відхилення залишків виконується двічі – окремо для лівої частини ВАХ, де під час фільтрації сигнал вважається нульовим за межами кінцевих точок, та для правої частини ВАХ, де обчислюються медіани менших відрізків при досягненні країв сигналу. Поділ ВАХ на дві частини проходить через MPP.

Після завершення процесу видалення аномальних значень додатково застосовується функція *cldata.m* для усунення можливих нових дублікатів. В командне вікно виводиться інформація про кількість видалених атипових значень та застосовані параметри функції.

Особливості розробленого алгоритму видалення аномальних значень у вигляді програмної функції *delot.m*:

Стійкість до аномалій. На відміну від середнього значення, медіана не піддається значному впливу аномалій, що робить MAD надійним критерієм виявлення спотворених даних.

Врахування форми кривої. Підхід дозволяє видалити аномальні відхилення без утворення нетипових деформацій кривої ВАХ.

Локальність аналізу. Використання ковзного вікна дозволяє аналізувати дані локально, забезпечуючи високу точність виявлення атипових значень.

Гнучкість параметрів. Масштабний коефіцієнт α та ширина ковзного вікна W можуть бути налаштовані відповідно до особливостей обраних даних.

3.1.3 Рівномірний розподіл вздовж довжини кривої

Після очищення даних розроблена програмна функція *udist.m* [Додаток 3] виконує рівномірний розподіл значень вздовж кривої $I(V)$, що необхідно для забезпечення однорідності розміщення точок при подальшому згладжуванні, моделюванні та аналізі експериментальних даних.

Довжина кривої $I(V)$ визначається як:

$$L = \int_0^{V_{oc}} \sqrt{1 + \left(\frac{dI}{dV}\right)^2} dV \quad (3.6)$$

На основі довжини L відбувається рівномірний розподіл точок через відрізки довжиною $L/(N-1)$, де N – задана кількість рівномірно розподілених точок, за замовчуванням дорівнює 200.

3.1.4 Адаптивне ковзне згладжування даних ВАХ ФМ на основі LOWESS

Важливим етапом досягнення гладкості та спадної монотонності експериментальних даних є процес згладжування, що дозволяє нівелювати негативний вплив шуму на розподіл точок. Беручи до уваги поведінку кривої ВАХ доцільно розробити власний підхід до згладжування, що враховуватиме зазначені раніше особливості ВАХ ФМ.

Розроблена програмна функція *dynlowess.m* [Додаток І] виконує адаптивне ковзне згладжування даних на основі LOWESS (Locally Weighted Scatterplot Smoothing) [129]. Особливістю є динамічний розмір вікна згладжування, що змінюється залежно від положення точки на кривій. Ширина вікна згладжування W_{dyn} змінюється для кожної точки за допомогою інтерпольованих вздовж кривої ВАХ базових значень розмірів вікна. Вікно W_{dyn} визначається як:

$$W_{dyn}(i) = \text{interp}(x_{key}, W_{base} \cdot W_{coef}), \quad (3.7)$$

де x_{key} – ключові точки інтерполяції;

W_{base} – базові значення розмірів вікна;

W_{coef} – коефіцієнт масштабування базових розмірів вікна.

Базові значення розмірів W_{base} вікна складають [30, 45, 45, 30, 15, 10, 10, 10, 7, 5] експериментальних точок, їх підібрано емпіричним шляхом таким чином, щоб враховувати поведінку кривої ВАХ ФМ на кожній її частині. Ключові точки інтерполяції x_{key} визначаються шляхом відповідного рівномірного розподілу складових W_{base} вздовж масиву експериментальних значень кривої ВАХ. Коефіцієнт масштабування базових розмірів вікна W_{coef} дозволяє автоматично змінювати дані розміри відповідно до загальної кількості експериментальних точок, що підлягають згладжуванню. Це дозволяє використовувати задані базові значення для масиву експериментальних даних будь якого розміру без втрати якості згладжування.

Описаний принцип розподілу розмірів вікна адаптивного згладжування продемонстровано на рис. 3.1, де кожна вертикальна лінія відповідає центру зони окремих ключових точок інтерполяції x_{key} , а діаметр круга відповідного кольору відображає розмір вікна W_{base} в експериментальних відліках в цій зоні.

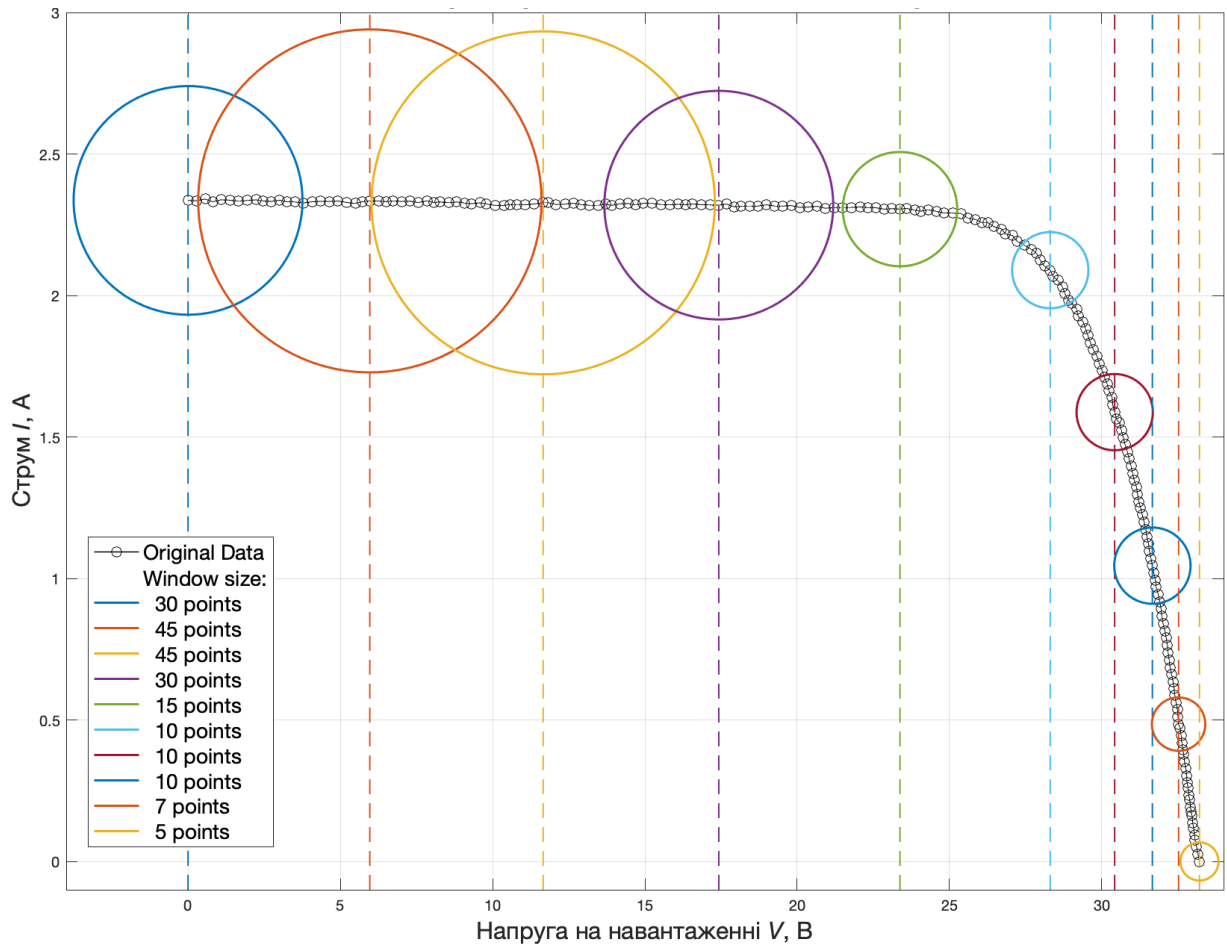


Рисунок 3.1 Розподіл та розміри вікна адаптивного згладжування

На рисунку відображено тільки базові значення розмірів W_{base} , між якими шляхом інтерполяції визначається дійсне значення розміру вікна W_{dyn} для кожної експериментальної точки.

Після первинного згладжування застосовується додаткове згладжування з фіксованим вікном розміром 7 точок для усунення можливих артефактів на межах зон з різним розміром адаптивного вікна. В командне вікно виводиться інформація про значення коефіцієнту масштабування базових розмірів вікна.

Для визначення ефективності та доцільності використання розробленого алгоритму адаптивного ковзного згладжування експериментальних даних ВАХ

ФМ методом LOWESS проведено порівняння з іншими популярними методами апроксимації та фільтрації даних. В якості вихідних даних використовується типова ВАХ ФМ з вимірюваною потужністю 60 Вт та низьким струмом КЗ на рівні 2.34 А, що призводить до збільшення рівня шумів. Вихідні дані після обробки розробленим алгоритмом фільтрації мають 200 пар значень струм-напруга, рівномірно розподілених вздовж кривої.

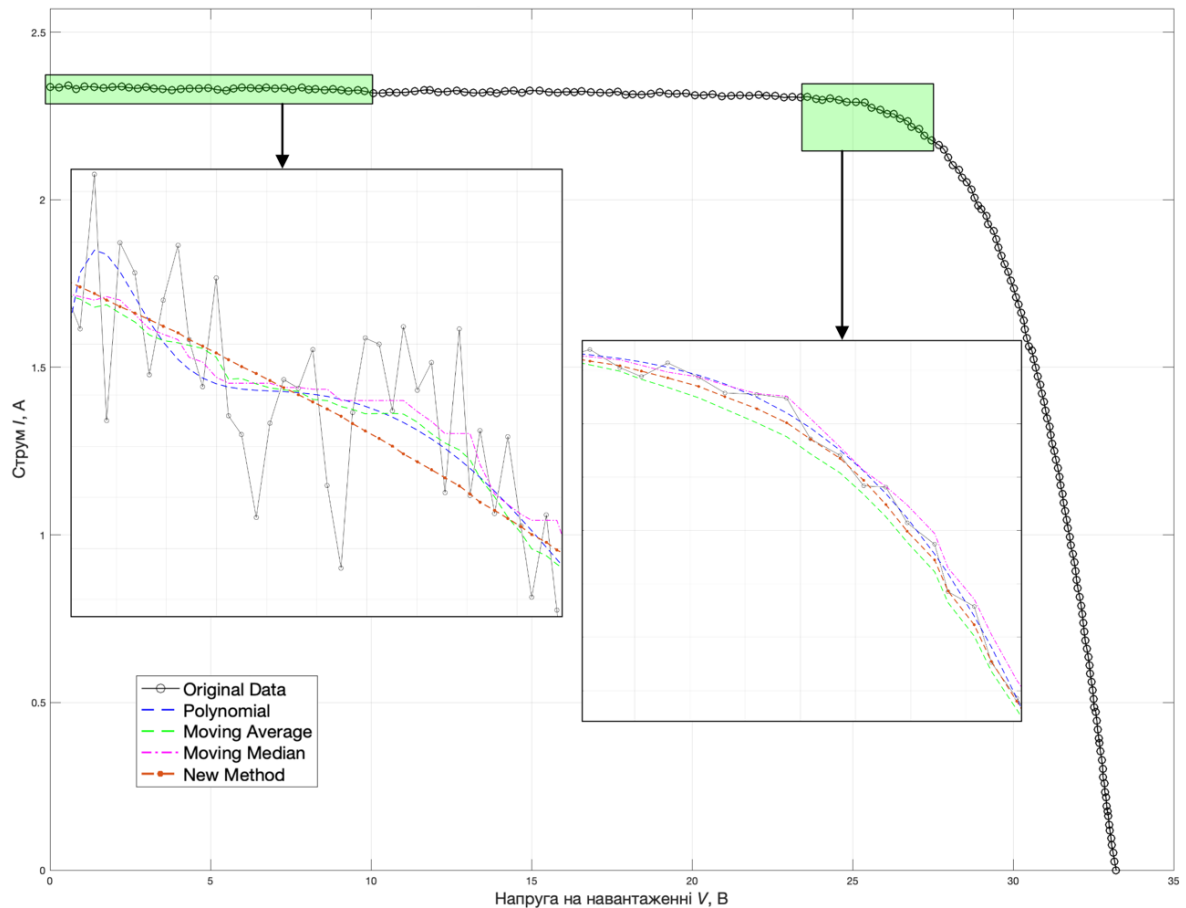


Рисунок 3.2 Порівняння з популярними методами згладжування

На рис. 3.2 відображено порівняння розробленого комплексного методу з такими популярними рішеннями, як поліноміальна апроксимація (ступінь полінома 13), ковзне середнє (розмір вікна 18 точок), ковзне медіанне (розмір вікна 18 точок).

На рис. 3.3 відображено порівняння з іншими більш складними методами: LOESS (розмір вікна 18 точок), LOWESS (розмір вікна 18 точок), Spline (параметр згладжування 9) та фільтр Савіцького-Голая (ступінь полінома 1, розмір вікна 9).

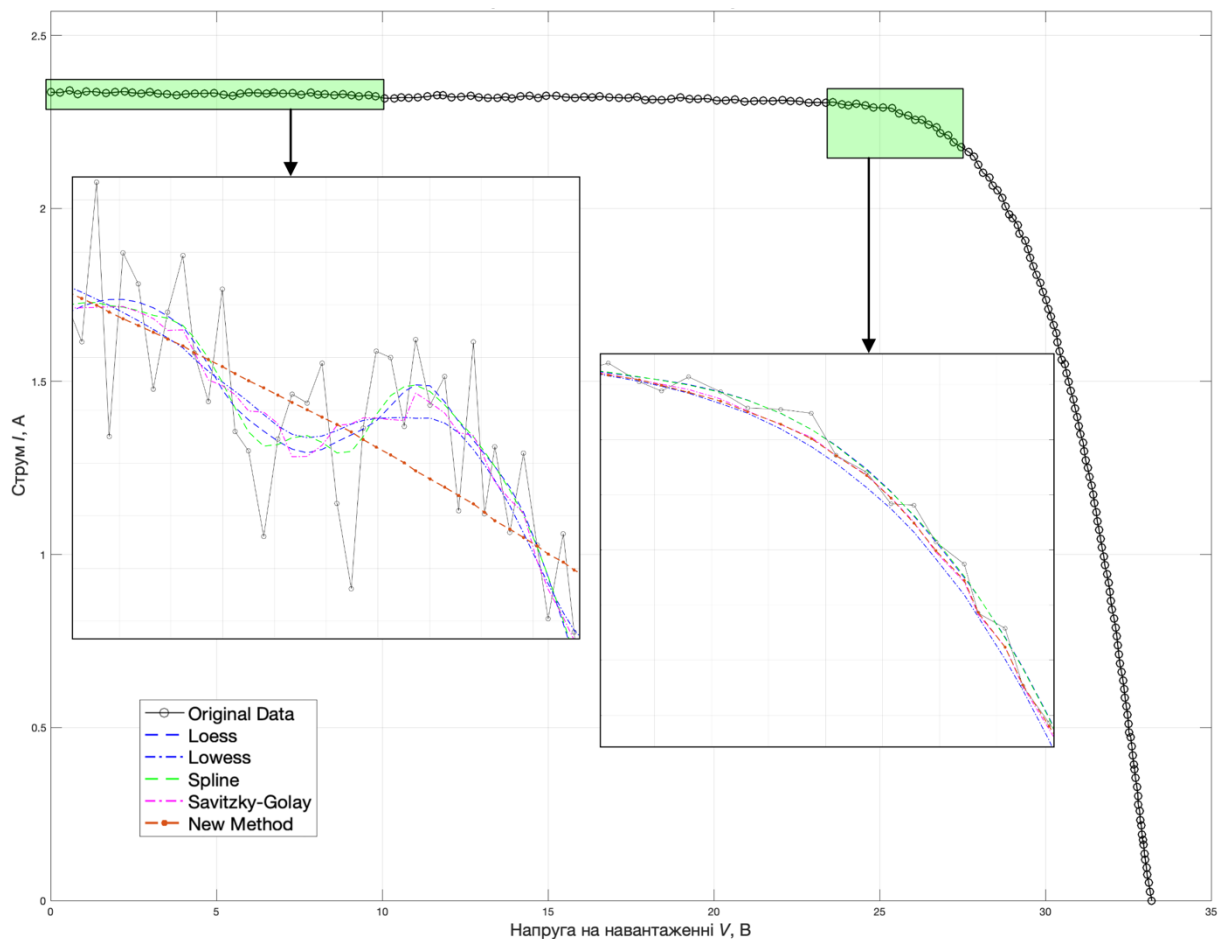


Рисунок 3.3 Порівняння з ускладненими методами згладжування

Оцінка точності апроксимації здійснюється звичайним та нормалізованим СКВ, коефіцієнт кореляції R^2 , сумою квадратів залишків та середньою абсолютною похибкою (табл. 3.1).

Отримані оцінки показують, що запропонований алгоритм адаптивного ковзного згладжування експериментальних даних ВАН на основі LOWESS забезпечує найбільше співпадіння з експериментальними даними та найкраще відповідає реальній поведінці ФЕК.

Спираючись на статистичні показники, фільтр Савіцького-Голая має достатню точність, але аналіз кривих на рис. 3.3. демонструє невідповідність згладженої кривої реальній поведінці ФЕК, що не дозволяє використовувати фільтр Савіцького-Голая при подальшому аналізі експериментальних даних.

Таблиця 3.1 – Статистичні показники методів згладжування

Методи	RMSE	nRMSE	R ²	SSE	MAE
<i>Moving Average</i>	0.01519	0.00649	0.99959	0.04614	0.00871
<i>Moving Median</i>	0.01561	0.00667	0.99957	0.04870	0.00878
<i>Savitzky-Golay</i>	0.00282	0.00120	0.99999	0.00159	0.00220
<i>Loess</i>	0.00427	0.00183	0.99997	0.00365	0.00323
<i>Lowess</i>	0.00555	0.00237	0.99995	0.00616	0.00420
<i>Spline</i>	0.00513	0.00219	0.99995	0.00527	0.00374
<i>Polynomial</i>	0.00582	0.00249	0.99994	0.00677	0.00413
Новий метод	0.00280	0.00120	0.99999	0.00157	0.00207

Результат роботи всіх етапів розробленого комплексного алгоритму фільтрації та апроксимації ВАХ ФМ продемонстровано на рис. 3.4, інформаційний вивід результатів роботи розроблених програмних функцій в командному вікні зображено на рис. 3.5.

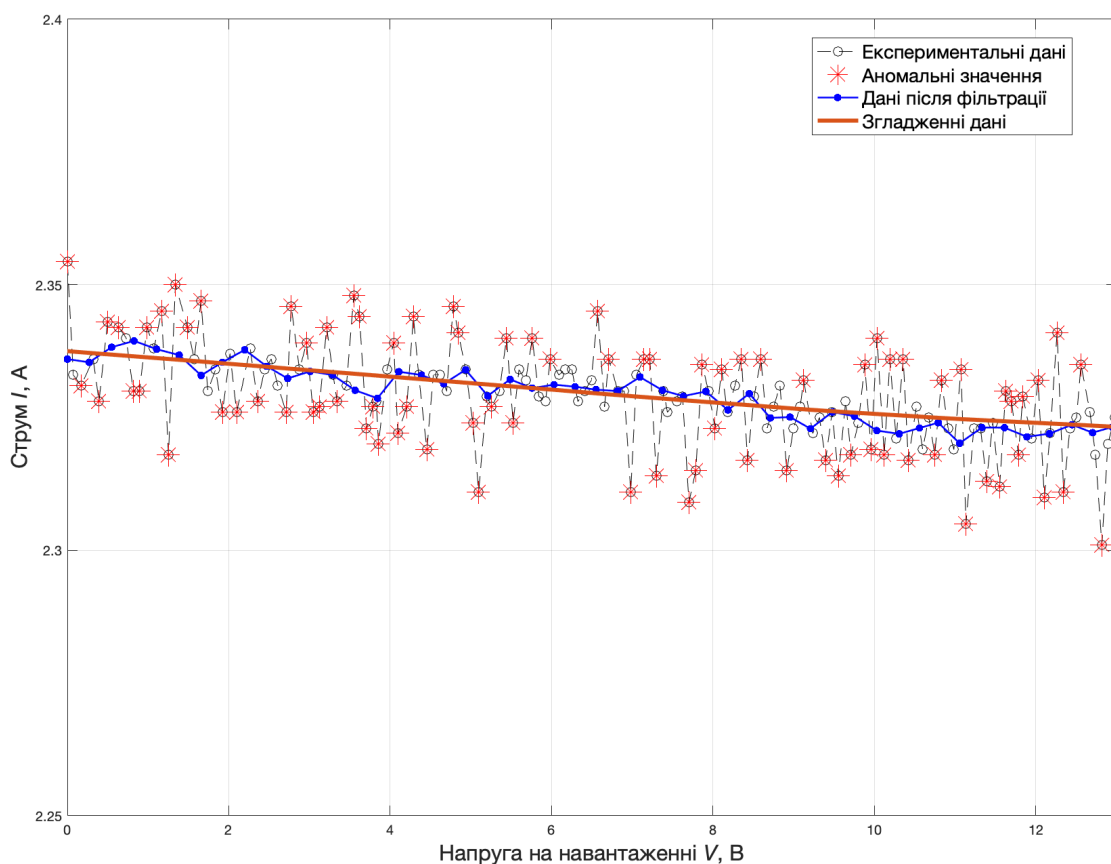


Рисунок 3.4 Етапи обробки експериментальних даних

```

=== Function: clean_data ===
Duplicates found: 15.

=== Function: clean_data ===
Duplicates found: 0.

=== Function: delot ===
Removed 160 outliers from a total of 563 points.
Dynamic window size determined: 51
Threshold multiplier used: 2.00

=== Function: udist ===
Number of points determined: 200

=== Function: dynlowess ===
Window size coefficient: 1
>>

```

Рисунок 3.5 Інформаційний вивід результатів роботи функцій

На основі табл.3.1 та рис. 3.3 і рис. 3.4 можна зробити висновок про доцільність використання розробленого комплексного алгоритму фільтрації та апроксимації експериментальних ВАХ та забезпечення даним алгоритмом достатнього рівня точності усунення інструментальних і радіаційних шумів та кореляції з експериментальними даними ВАХ ФМ.

3.2 Рекомбінаційні струми в фотоелектричних перетворювачах

Рекомбінація представляє собою повсюдний ефект, який зменшує ККД і потужність ФЕ, впливає на їхні вольт-амперні характеристики та важливі параметри. Фотоелектричні перетворювачі працюють як неідеальні генератори струму, в яких частина фотогенерованих електронів та дірок рекомбінує всередині комірки, живлячи внутрішній струм через *pn*-перехід, а не інжектується у зовнішнє навантаження.

Сучасна класифікація механізмів рекомбінації в високоефективних кремнієвих комірках, виконаних в лабораторних умовах за досконалими технологіями, виглядає наступним чином [130]:

- рекомбінація Шоклі-Ріда-Холла (SRH),
- рекомбінація Оже,
- випромінювальна рекомбінація,

- поверхнева рекомбінація,
- рекомбінація в області просторового заряду (ОПЗ)
- рекомбінація екситонів (анігіляція екситонів).

Перші чотири механізми традиційно розглядаються при моделюванні рекомбінаційних втрат (наприклад, [131]), необхідність врахування останніх двох, рекомбінації в ОПЗ та екситонної, обґрунтовується в ряді робіт [130, 132].

З перелічених варто розглянути ті механізми, які грають суттєву роль у рекомбінаційних втратах не тільки в досконалих комірках, але і в масових промислових фотоелектричних модулях.

3.2.1 Рекомбінація Шоклі-Ріда-Холла

Відома класична модель Шоклі-Ріда-Холла (Shockley-Read-Hall, SRH) [28, 29] кількісно визначає швидкість рекомбінації в напівпровідникових матеріалах з різким (металургійним) *pn*-переходом. На основі цієї моделі звичайно розглядається рекомбінація через один рівень дефекту, яка відбувається в області збіднення. Вклад рекомбінаційних процесів в струм через *pn*-перехід враховується шляхом введення коефіцієнта ідеальності у знаменник показника експоненти. Варто відмітити, що індивідуальні властивості центрів генерації-рекомбінації сильно залежать від технології виготовлення ФЕ. В моделі SRH ці властивості зазвичай об'єднуються в такі величини, як ефективний час життя електронів і дірок, в результаті чого отримується одна ефективна швидкість однорівневої рекомбінації.

Оскільки пастки можуть поглинати різницю в імпульсі між носіями, рекомбінація SRH є домінуючим процесом в кремнії та інших матеріалах з непрямою забороненою зоною. Однак рекомбінація за допомогою пасток також може домінувати в матеріалах з прямою забороненою зоною в умовах дуже низької щільності носіїв (дуже низький рівень інжекції) або в матеріалах з високою щільністю пасток, наприклад, в перовскітах [133].

Зазначимо припущення теорії SRH, на основі якої обчислюються ВАХ [25]:

- різкі межі області збіднення основними носіями, що означає компенсацію прикладеної напруги та контактної різниці потенціалів напругою подвійного зарядженого шара;
- в області збіднення носії заряду знаходяться у квазістаціонарному стані, і для них справедливі розподіли Больцмана;
- невисокі рівні інжекції (концентрація неосновних носіїв мала у порівнянні з концентрацією основних носіїв);
- відсутність генерації та сталі електронний та дірковий струми в області збіднення.

Як показано в роботі [134], струм, сформований процесами генерації-рекомбінації, представляє основну частину струму через *pn*-перехід при низьких рівнях інжекції. Цей струм як функція прикладеного прямого потенціалу V має форму:

$$I_r = I_{r0} \exp\left(\frac{V}{Av_T}\right), \quad (3.8)$$

де I_{r0} — значення струму зворотного насичення;

v_T — «теплова напруга»;

A — коефіцієнт ідеальності діода.

Прямий струм у режимі генерації-рекомбінації з урахуванням того, що електрони і дірки однаково сприяють генерації, визначається як:

$$I_r = 2q \int_{x_1}^{x_2} R dx, \quad (3.9)$$

де R — швидкість рекомбінації, а інтегрування здійснюється в області рекомбінації.

Слід зазначити, що в моделі роботи [134] механізм рекомбінації забезпечувався з коефіцієнтом A , незалежним від напруги. На це була звернута увага в статті [135], де стверджувалось про несумнівну наявність такої залежності. Чисельні розрахунки в рамках моделі SRH залежності струму від

напруги для кремнієвої комірки, які проведені в роботі [136], показали наступний характер змінення A :

- нахил кривої логарифму прямого струму та відповідно коефіцієнт ідеальності A залежать від розташування рівня пасток E_t відносно середини забороненої зони E_i (рис. 3.6);
- при $\delta = \frac{|E_i - E_t|}{kT} < 3$ крива струму однорідно нахилена зі значенням $A = 1.6 \div 2$ в широкому діапазоні V , аж до напруги комірки 0.9 В;
- при $\delta \geq 3$ інтервал з підвищеним A скорочується і зовсім зникає при $\delta \geq 10$ – при такому положенні енергетичного рівня пастки крива струму має загальний нахил з $A = 1$;
- мале значення A , близьке до 1, характерно також для дуже малих рівнів інжекції;

Таким чином можна стверджувати, що високі значення A , які спостерігаються на експерименті, пов'язані з глибокими дефектними рівнями, які грають роль пасток.

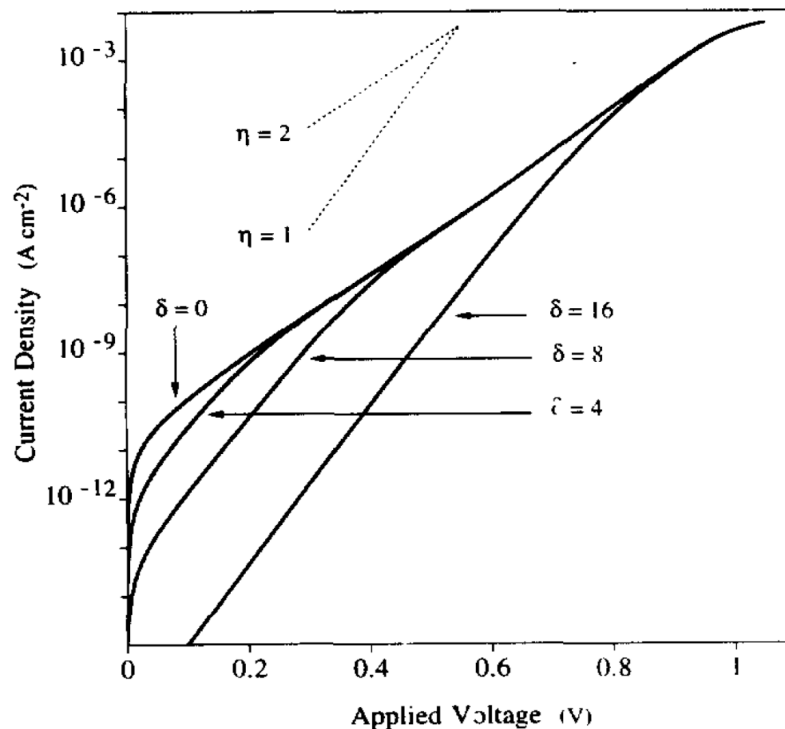


Рисунок 3.6 Рекombінаційний струм для однорівневої пастки в pn -переході для різних значень параметра $\delta = \frac{|E_i - E_t|}{kT}$ [136]

Аналіз залежності коефіцієнта ідеальності від напруги, обумовленої рекомбінацією в області збіднення, був проведений в роботі [137]. Порівняння результатів, отриманих згідно моделі однорівневої рекомбінації [28] та її модифікацій [134, 138], а також шляхом чисельного розрахунку показало, що коефіцієнт A знаходиться в межах від 1 до 2, причому моделі, які містять більше припущень, як правило, переоцінюють A .

3.2.2 Рекомбінація в області просторового заряду

Струми генерації-рекомбінації в ОПЗ pn -переходу були вперше проаналізовані авторами [134]. В цій класичній роботі аналітичні вирази для рекомбінаційного струму через симетричний pn -перехід отримані інтегруванням швидкості рекомбінації у припущенні існування однорівневих пасток, розташованих в середині забороненої зони. Поширення цієї моделі на асиметричний pn -перехід було зроблено в роботі [139]. У цій роботі було проаналізовано вплив на швидкість рекомбінації концентрацій легування, перерізу захоплення, асиметрії та рівня енергії пастки, але знову було прийнято обмеження одним рівнем. Розрахунок коефіцієнта ідеальності для цього наближення (див. попередній розділ) показав знаходження його в інтервалі $1 < A < 2$ [136].

Однією з дуже перспективних ефективних структур є гетероперехідні кремнієві фотоелектричні елементи. В таких конструкціях, що виробляються шляхом низькотемпературного росту надтонких шарів аморфного кремнію, аморфний кремній ($a\text{-Si:H}$) діє як емітер. Базою є тонка кристалічна кремнієва пластина-основа ($c\text{-Si}$), де електрони та дірки фотогенеруються. Водночас аморфний шар $a\text{-Si:H}$ пасивує поверхню $c\text{-Si}$. Ефективність таких комірок може перевищувати 23%.

Розгляд рекомбінаційних процесів в області просторового заряду у системах з pn -гетеропереходами, які виявились дуже перспективними для фотоенергетичних застосувань, виконувався в багатьох роботах. В одній з перших статей [140] аналізувались ситуації з будь-яким розташуванням рівня пасток та різними часами життя неосновних носіїв та було зроблено загальне

формулювання струмів рекомбінації SRH. Були визначені найбільш вигідні з точки зору мінімізації рекомбінації співвідношення між концентраціями легування по обидва боки гетеропереходу з асиметричним ОПЗ.

Рекомбінаційні струми гетероперехідних α -Si:H/Si більш детально були проаналізовані в роботі [141] з урахуванням співвідношення між рівнем легування кремнію та надлишковою концентрацією електронно-діркових пар. В дослідженні показано, що більш високим рівням легування відносно надлишкової концентрації пар відповідають менші значення A , аж до $A = 1$. В області напруги $V > 0.5\text{В}$ на гетероперехідному ФЕ на основі α -Si:H/Si поведінка ВАХ визначається дифузійним струмом, а при малих зміщеннях ВАХ можна описати рекомбінаційним механізмом з $A = 2$. Таким чином, навіть з великою концентрацією пасткових рівнів в емітерному шарі система демонструє поведінку ВАХ, схожу на однорівневу модель пасток.

3.2.3 Поверхнева рекомбінація

На поверхневу рекомбінацію почали звертати увагу у зв'язку зі значними струмами витоку по периметру емітера біполярного транзистора, особливо при збільшенні напруги на переході емітер-база [142]. Це зазвичай приписується пасткам інтерфейсу та фіксованим зарядам оксиду внаслідок інжекції гарячих носіїв на краю оксидної бічної стінки кремнію. В роботі [143] експериментально і на теоретичній моделі показано, що поверхневий рекомбінаційний струм має $A > 2$.

В сонячних елементах на верхній поверхні, яка є областю найвищої генерації носіїв, високі швидкості рекомбінації особливо несприятливо впливають на струм короткого замикання. Для зниження цієї поверхневої рекомбінації використовується пасивуючий шар, що зменшує кількість розірваних зв'язків кремнію, що висять на верхній поверхні. В промислових ФМ ця функція покладається на термічно вирощений шар діоксиду кремнію (або нітриду кремнію) – після пасивації інтерфейс має низький рівень дефектних станів.

Для зниження впливу швидкості рекомбінації над тильним контактом використовується аналогічна обробка задньої поверхні, якщо вона знаходиться ближче, ніж довжина дифузії до pn -переходу. Поле задньої поверхні (back surface field, BSF) складається з сильно легованої області. Інтерфейс між низько- та високолегованими областями діє аналогічно pn -переходу, і на інтерфейсі формується електричне поле, яке створює бар'єр для потоку неосновних носіїв до задньої поверхні. В результаті концентрація неосновних носіїв на задній поверхні підтримується на більш високих рівнях.

3.3 Причини підвищених струмів рекомбінації в промислових ФМ

В цьому розділі дисертації розглянуті основні механізми рекомбінації, які дають найбільш згубний вплив на ефективність фотоелектричних перетворювачів. Вплив рекомбінації яскраво можна побачити при обробці експериментальних ВАХ промислових ФМ по суттєвому відхиленню коефіцієнта ідеальності та зворотного струму насичення від ідеальної моделі діода.

Незвичайна поведінка сонячних батарей промислового виготовлення була помічена ще в 60-х роках 20 століття [144], а саме експоненціальна залежність темного струму від напруги мала фактор ідеальності $A = 3$. Цей множник в показнику ступеня, який суттєво перевищував значення A лабораторних зразків, не міг бути задовільно пояснений. Експерименти показували, що ситуація не є загальною властивістю всієї комірки, а виходить з локалізованих областей переходу, переважно на краях комірки. Крім того, термічна обробка при температурах досить низьких, щоб виключити помітну дифузію донорів і акцепторів, призводила до значних змін в характеристиках. Результати інтерпретувались як вплив певних дефектів, що викликають підвищення A та зниження ефективності комірки.

3.3.1 Крайова рекомбінація

В моделі SRH передбачається, що пастки (точкові дефекти) рівномірно розподілені у всій області збіднення. Але ще в 60-х роках [144] стверджувалось, що струми з $A > 2$, не походять від однорідно розподілених дефектів, вони

обумовлені локальними ділянками з дуже високою щільністю дефектів. Пізніше це було експериментально підтверджено засобами синхронної (lock-in) термографії, яка дозволяє спостерігати осциляції температури, обумовлені дефектами [145]. Наприклад, було встановлено, що підвищений рекомбінаційний струм можна спостерігати у всій крайовій області зразка, але крайова щільність струму має піки тільки на кількох ділянках краю, які автори називають локальними крайовими шунтами. Термографія показала, що коефіцієнт A зазвичай більше 2 лише у цих локальних крайових шунтах, тоді як в інших крайових областях $A < 2$, тобто згідно з теорією SRH [146].

Втратам на крайовій рекомбінації приділяється підвищена увага при оптимізації конструкції високоефективних ФМ, для яких характерне збільшене співвідношення краю до площі ФЕ, наприклад в модулях з половинними комірками (half-cell), або з черепичною (shingle) конструкцією [147], а також в фотоелектричних комірках із заглибленими контактами (buried contact) [148].

Широко використовується та прийнятий до моделювання крайової рекомбінації підхід полягає у застосуванні паралельного шунтуючого діода з коефіцієнтом ідеальності 2. Це обґрунтовується тим, що крайові втрати переважають рекомбінацію в області просторового заряду [149, 150].

Значний вплив крайової рекомбінації на ефективність сонячних комірок досліджувався в ряді робіт МакІнтоша [151]. Швидкість рекомбінації на краях ФЕ часто набагато більше, ніж в інших частинах ФЕ. Крайові області на відміну від передньої і задньої поверхні, звичайно не пасивуються. Через це швидкість крайової рекомбінації додатково підвищується, коли pn -перехід простягається до краю. В роботі [152] стверджується, що струм рекомбінації в збідненій області не тече однорідно, він найбільш виражений там, де протяжні рекомбінаційно-активні дефекти перетинають pn -перехід, тобто на краю елемента.

Крім того, можливі електростатичні ефекти на краях – заряджені поверхні на краях комірки створюють потенціальну яму, яка розширює область рекомбінації і значно збільшує її внесок у загальний струм.

В згаданих вище роботах крайова рекомбінація моделюється, як правило, шунтуючим діодом в схемі заміщення. Однак коефіцієнт ідеальності значно перевищує 2 при середніх значеннях напруги, для деяких конструкцій ФЕ на кривій $A(V)$ спостерігається пік висотою більше 6 (рис. 3.7).

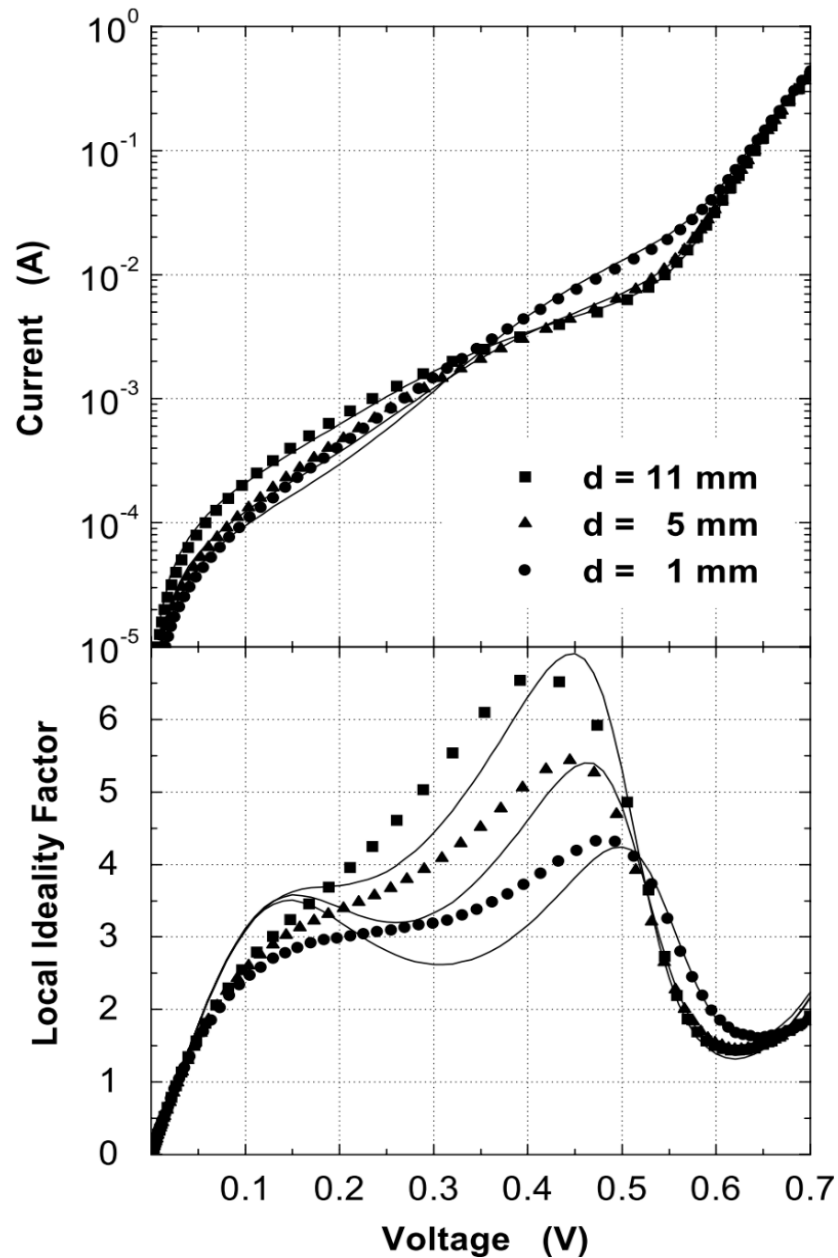


Рисунок 3.7 Залежності $\ln I(V)$ і $A(V)$ при різних значеннях d – відстані фронтальної контактної сітки до краю ФЕ [151]

3.3.2 Роль мікроструктурних дефектів

Промисловим ФМ, особливо виготовленим з мультикристалічного кремнієвого матеріалу, притаманні специфічні види рекомбінаційних втрат, які

не враховуються в класичних моделях рекомбінації. Це можна вже зрозуміти з огляду, наприклад, на локальні неоднорідності темнового струму, які досліджуються методом синхронної термографії (див. розд. 3.3.1). Неоднорідності струму виникають внаслідок, наприклад, подряпин або деяких інших поки невідомих дефектів. Основною причиною великого коефіцієнта ідеальності на таких дефектах в роботі [152] вважається багаторівнева рекомбінація, яка ефективна лише для протяжних дефектів з високою локальною щільністю глибоких станів. Такий тип дефектів також є джерелом омічних струмів при слабкому зворотному зміщенні за рахунок стрибкової провідності. Варто зауважити, що іншими важливими джерелами омічного струму є частинки Al на поверхні, тріщини, не повністю відкритий край та нитки SiC у мультикристалічному матеріалі.

Підтвердженням підвищених рекомбінаційного струму та коефіцієнта ідеальності внаслідок протяжних дефектів є експерименти [152, 153] з високоефективними комітками типу *PERL* площею 1 см^2 , на поверхню яких наносились подряпини діамантовим індентором. Вихідні (на чистих зразках) темнові ВАХ цих комірок мали коефіцієнт ідеальності нижче 1,5 у всьому діапазоні напруг, а зворотний струм був сублінійним. Нанесення подряпин при різному навантаженні на індентор принципово змінювало вигляд цих залежностей (рис. 3.8). Більш високе навантаження при створенні подряпин призводило до більшої ступені неідеальності комірок. Отримані для подряпаних комірок залежності були схожими на результати вимірювання промислових зразків.

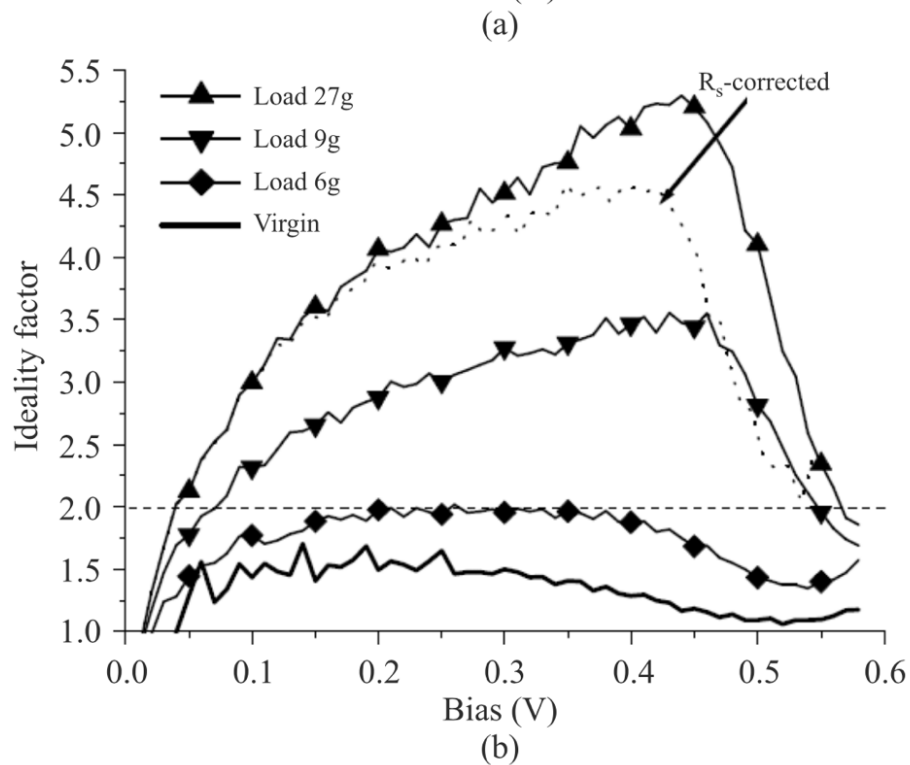
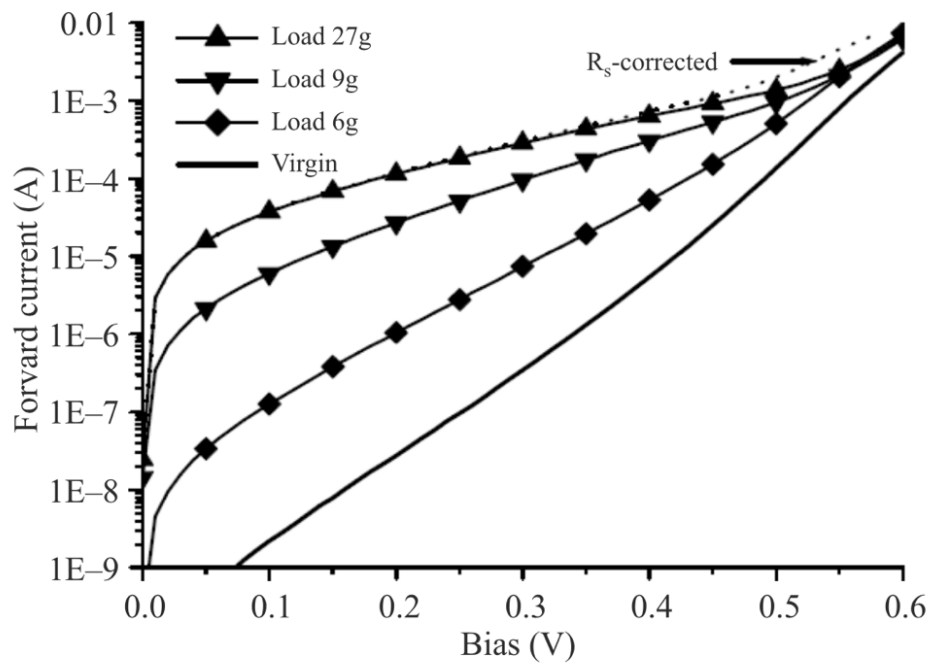


Рисунок 3.8 Темнові прямі характеристики (а) та залежності коефіцієнта ідеальності (б) чистого ідеального ФЕ (пряма лінія) та трьох елементів, що мали паралельні подряпини у вигляді сітки з кроком 1 мм, зробленими з різними навантаженнями на діамантовий індентор [152]

Для пояснення наведених даних в [153] пропонується наступний механізм рекомбінації. Мікроструктурні дефекти характеризуються глибокими енергетичними рівнями у забороненій зоні та мають дуже локалізовану

хвильову функцію. При великій концентрації дефектів їхні хвильові функції перекриваються. Тоді, за думкою авторів, може реалізовуватись рекомбінація донорно-акцепторних пар (donor-acceptor-pair, DAP). Якщо такі приповерхневі шари з великою концентрацією дефектів перетинаються з областю збіднення *pn*-переходу, рекомбінація може забезпечити короткий шлях для носіїв через *pn*-перехід: їм не потрібно термічне збудження вище всього потенційного бар'єру через *pn*-перехід.

3.4 Розробка нового підходу до моделювання ФМ

При моделюванні ВАХ ФМ параметри схем заміщення, як правило, вважаються постійними та незалежними від напруги (див. розд. 1.4). В той же час експерименти, виконані на різного типу фотоелектричних комірках, показують, що вклад рекомбінації в загальний струм відносно дифузійного змінюється з напругою. В більшості робіт (див. розд. 1.4.2) прийнятий спрощений підхід, при якому такий характер струму представляється у вигляді двох діодних струмів і відповідно дводіодна схема заміщення ФЕ. В даній роботі ВАХ моделюється з допомогою одnodіодної схеми заміщення зі змінними з напругою параметрами, в першу чергу, A та I_0 , які безпосередньо пов'язані з процесами рекомбінації. Рекомбінаційні втрати зумовлені безліччю факторів (див. розд. 3.2-3.3), їх природа досі недостатньо вивчена, на відміну від омічних втрат, але вони суттєво впливають на навантажувальні ВАХ, знижуючи ефективність ФМ.

Можливість змінного характеру зворотного струму та фактору ідеальності розглядалася в ряді робіт [152, 153, 154], автори яких вказували на необхідність урахування змінної природи параметрів схем заміщення, особливо при малих рівнях генерації (освітлення), коли *pn*-перехід не повністю відкритий.

Визначення залежності параметрів A , I_0 від напруги V надає можливість зробити точну модельну апроксимацію експериментальних ВАХ ФЕ за різних рівнів сонячної радіації, навіть точнішу в «проблемної» області MPP, ніж це можливо за допомогою процедур знаходження фіксованих значень параметрів в одно- та дводіодних схем.

В рамках даної роботи запропоновано модель та алгоритм визначення залежності параметрів однодіодної схеми заміщення від напруги на навантаженні, та аналізу впливу $A(V)$, $I_0(V)$ на ВАХ ФМ.

Параметри елементів схеми заміщення характеризують генерувальну здатність ФМ й електричні втрати, а також вплив зовнішніх умов. Навантажувальна ВАХ $I(V)$ для однодіодної моделі ФМ описується з використанням класичної моделі pn -переходу SRH [25] у вигляді наступних рівнянь [15]:

$$I_{ph} - I_p - I_d - I = 0, \quad (3.10)$$

де $I = in_p$ – напруга та струм в навантаженні;

$I_{ph} = i_{ph}n_p$ – струм фотогенерації;

I_d – діодний струм;

Діодний струм у виразі (3.10) визначається:

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V+IR_s}{An_s v_T}} - 1 \right), \quad (3.11)$$

де $V = vn_s$ і $I = in_p$ – напруга та струм в навантаженні;

I_0 – зворотний струм насичення діода;

A – коефіцієнт ідеальності діода;

$R_s = r_s n_s / n_p$ – еквівалентний послідовний опір;

n_s – кількість послідовно з'єднаних комірок ФМ;

n_p – кількість паралельно з'єднаних комірок ФМ.

Струм через паралельний опір:

$$I_p = \frac{V + IR_s}{R_p}, \quad (3.12)$$

де $V = vn_s$ і $I = in_p$ – напруга та струм в навантаженні;

$R_s = r_s n_s / n_p$ – еквівалентний послідовний опір;

$R_p = r_p n_s / n_p$ – еквівалентний паралельний опір.

Теплова напруга у виразі (3.11) розраховується як:

$$v_T = \frac{kT}{q}, \quad (3.13)$$

де q – заряд електрона;

k – постійна Больцмана;

T – температура.

Загальний вираз для ВАХ ФМ на основі рівнянь (3.10)–(3.13) має вигляд:

$$F(I, V) = I \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right) - I_{ph} + \frac{V}{R_p} + I_0 \left(e^{\frac{V + IR_s}{A n_s v_T}} - 1 \right) = 0 \quad (3.14)$$

3.4.1 Оцінки послідовного та паралельного опорів втрат

Серед даних літератури [155-158] існують деякі протиріччя, особливо щодо параметрів, пов'язаних з процесами електричних втрат та рекомбінації. Наприклад, числові значення R_s , R_p , які отримані одного і того ж модуля різними методами, можуть різнитися у кілька разів, а I_0 – навіть на кілька порядків. Це свідчить або про недоліки вибраних оптимізаційних процедур, або про неадекватність діодних моделей з постійними значеннями шуканих параметрів на всьому діапазоні відліків. Конструкція ФМ (наприклад, виготовлених за технологією PERC або PERL) включає різні резистивні внески в сумарні електричні втрати: омичні об'ємні опори напівпровідників, контактні опори, опори витоку. В простих еквівалентних схемах заміщення для опису об'ємних опорів шарів матеріалів і контактних опорів у конструкції ФМ введено послідовний опір втрат R_s . Від нього залежить положення MPP на кривій ВАХ і, що найважливіше, – ефективність ФМ, тобто відношення електричної потужності одиничної площі модуля до інтегральної інтенсивності падаючого сонячного випромінювання. При збільшенні R_s робоча точка (MPP) зміщується в бік меншої напруги і, відповідно, падає потужність у навантаженні [15]. У процесі тривалої експлуатації ФЕС відбувається поступове збільшення електричних і теплових втрат у ФМ, тому велике значення має розробка ефективного оперативного методу визначення параметра R_s .

Значення R_s не може бути виміряне безпосередньо і, по суті, являє собою окрему проблему, різні методи розв’язання якої пропонувалися на різних етапах розвитку фотоелектрики [159, 160, 161]. Всі відомі методи в роботі [160] поділено на три категорії: методи, що оперують з даними ВАХ; методи, в яких використовують похідні від функції ВАХ, і, нарешті, методи, пов’язані із застосуванням інтегралів або комбінацій інтегралів із похідними та функціями ВАХ. Частина методів, крім освітленої ВАХ, вимагає вимірювання темної ВАХ, тобто кривої $I(V)$ за відсутності освітлення. Деякі методи вимагають графічної побудови ще й третьої кривої ВАХ при змінному рівні сонячної радіації [161]. Процедуру визначення R_s прописано також у стандарті ІЕС 60891:2021 Міжнародної електротехнічної комісії [162].

В даній роботі R_s оцінимо наступним чином. Цей параметр найбільш сильно впливає на ВАХ в інтервалі напруги від MPP до холостого ходу [15, 25], а саме, падіння напруги на R_s змінює нахил спадаючої ділянки ВАХ (рис. 3.9).

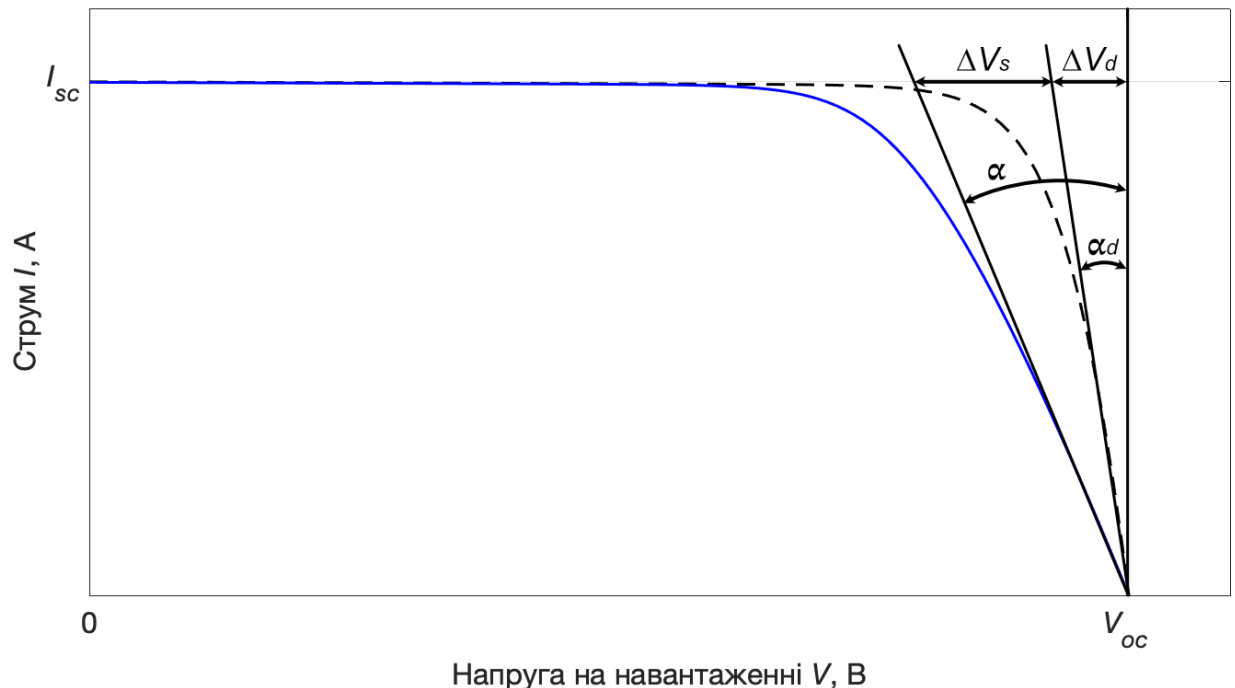


Рисунок 3.9 Ілюстрація впливу послідовного опору R_s на ВАХ ФЕ:

штрихова лінія – діодна ВАХ $I_d(V)$ при $R_s = 0$;

суцільна лінія – ВАХ $I(V)$ з врахуванням R_s .

Кути нахилу дотичних до цих кривих в точці V_{oc}

позначені α_d та α відповідно.

Кути нахилу α_d та α дотичних (рис. 3.9) до кривих $I_d(V)$ та $I(V)$ в точці V_{oc} визначаються через похідні:

$$tg \alpha_d = \left(\frac{dI_d}{dV} \right)_{oc, R_s=0}^{-1} \quad (3.15)$$

$$tg \alpha = \left| \left(\frac{dI}{dV} \right)_{oc}^{-1} \right| \quad (3.16)$$

На рис. 3.9 показані дотичні, проведені в точці холостого ходу до кривої ВАХ ФЕ, яка будується на експериментальних відліках, і до кривої ВАХ діоду (3.11) при $R_s = 0$. Ці дотичні утворюють відповідно кути α_d (3.15) та α (3.16) до вертикалі та мають на рівні $I_{sc} \approx I_{ph}$ відстані від вертикалі, що дорівнюють:

$$\Delta V = I_{ph} \left| \left(\frac{dI}{dV} \right)_{oc}^{-1} \right|, \quad (3.17)$$

$$\Delta V_d = I_{ph} \left| \left(\frac{dI_d}{dV} \right)_{oc, R_s=0}^{-1} \right|, \quad (3.18)$$

В той же час:

$$\Delta V = \Delta V_d + \Delta V_s, \quad (3.19)$$

де

$$\Delta V_s = I_{ph} R_s \quad (3.20)$$

Похідна в правій частині (3.17), яка є диференціальною провідністю, обчислюється з експериментальної ВАХ. Введемо позначення:

$$G_{oc} = - \left. \frac{dI}{dV} \right|_{oc} > 0 \quad (3.21)$$

Тоді для R_s на основі формул (3.17)–(3.21) отримуємо наступне:

$$R_s = \frac{1}{G_{oc}} - \left| \left(\frac{dI_d}{dV} \right)_{oc, R_s=0}^{-1} \right| \quad (3.22)$$

Похідну в (3.22) знаходимо диференціюванням діодного струму (3.11) $R_s = 0$:

$$\left(\frac{dI_d}{dV} \right)_{oc, R_s=0} = \frac{I_0}{An_s V_T} \left(1 - \frac{V_{oc}}{A} \frac{dA}{dV} \right)_{oc} e^{\frac{V_{oc}}{An_s V_T}} + \frac{dI_0}{dV} e^{\frac{V_{oc}}{An_s V_T}} \quad (3.23)$$

Далі вважаємо, що вклад членів з похідними від A та I_0 не значний у сенсі:

$$\frac{V_{oc}}{A} \left| \left(\frac{dA}{dV} \right)_{oc} \right| \ll 1 \quad (3.24)$$

$$\frac{An_s V_T}{I_0} \left| \left(\frac{dI_0}{dV} \right)_{oc} \right| \ll 1 \quad (3.25)$$

Це показують експериментальні залежності логарифму $\ln I_d$ діодного струму в околиці V_{oc} у більшості ФЕ, навіть у елементів зі значною щільністю дефектних станів і великими A поблизу МРР. Дійсно, крива $\ln I_d$ практично не змінює свого нахилу при $V \rightarrow V_{oc}$. При цих припущеннях маємо:

$$\left. \frac{dI_d}{dV} \right|_{oc} = \frac{I_{ph}}{An_s V_T}, \quad (3.26)$$

де враховано, що з рівняння балансу (3.10) при $I = 0$ та $I_p \ll I_d$ в околиці V_{oc} слідує $I_{d,oc} \approx I_{ph}$.

Підстановка (3.26) в (3.22) після перетворення отримаємо оцінку для R_s :

$$R_s = \frac{1}{G_{oc}} - \frac{An_s V_T}{I_{ph}} \quad (3.27)$$

За процедурою, аналогічною знаходженню R_s , оцінимо паралельний опір R_p . При цьому дотичні до ВАХ $I(V)$ та $I_d(V)$ проводимо в точці короткого замикання I_{sc} , оцінюємо довжину відрізків за струмом ΔI , ΔI_d для певної невеликої напруги на горизонтальній ділянці ВАХ аналогічно оцінці відрізків ΔV , ΔV_d . Оскільки діодний струм при невеликій напрузі надзвичайно малий $I_d \ll 1$, можна знехтувати припущенням $\Delta I_d \ll 1$. В результаті отримуємо оцінку для R_p :

$$R_p \approx \frac{1}{G_{sc}}, \quad (3.28)$$

де G_{sc} – диференціальна провідність при $V = 0$, коли $I = I_{sc}$, що визначається з експериментальних даних:

$$G_{sc} = - \left. \frac{dI}{dV} \right|_{V \rightarrow 0} = \left. \frac{\partial F / \partial V}{\partial F / \partial I} \right|_{V \rightarrow 0} \quad (3.29)$$

Вимірювання ВАХ при різних інтенсивності радіації, падаючої на приймальну поверхню ФМ (в даному разі Risen RSM60-6-280P), дозволили за допомогою формули для опору R_s (3.22) отримати дані, які відображені на рис. 3.10. Лінійна регресія множини даних для приблизно однакових температурних умов показує, що опір втрат R_s від інтенсивності сонячної радіації практично не залежить.

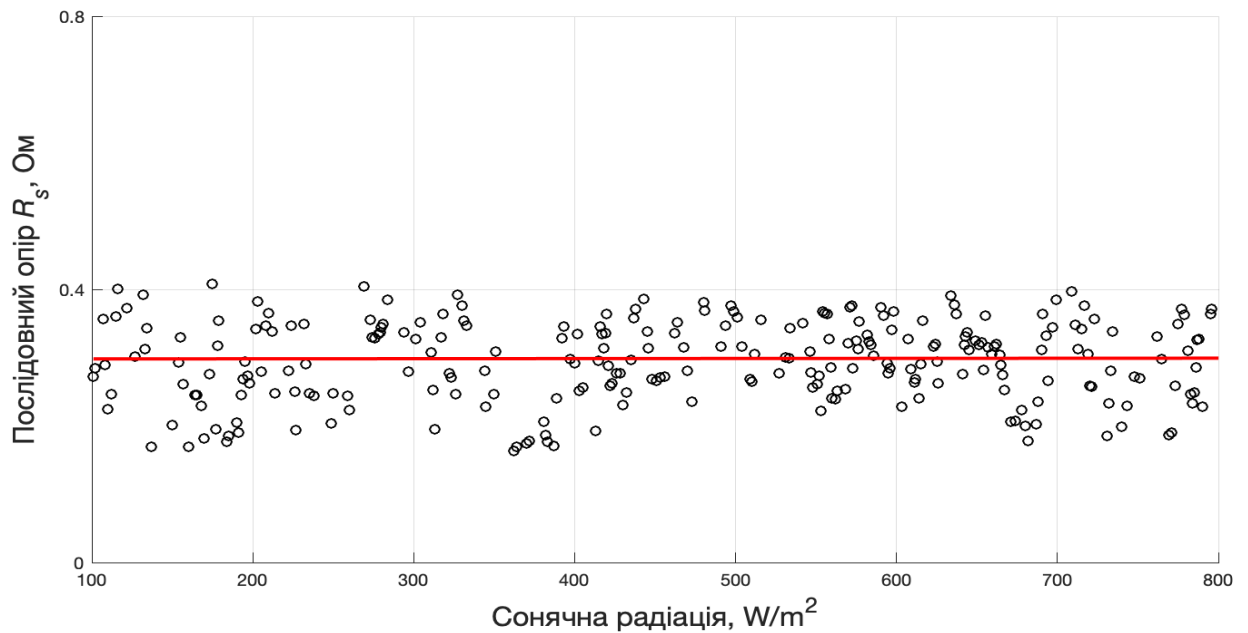


Рисунок 3.10 Результати розрахунків послідовного опору R_s при різних рівнях іррадіації за формулою (3.22)

Тенденцію поведінки паралельного опору при змінних радіаційних умовах з'ясувати точно не вдалось внаслідок дуже малих значень похідної ВАХ в області короткого замикання і відповідно малих G_{sc} (3.29).

3.4.2 Розрахунок змінних параметрів ФМ

Для моделювання ФМ зі змінними параметрами на основі аналізу ВАХ при різних рівнях іррадіації було обрано фотоелектричні модулі Risen RSM60-6-280P (див. розд. 2.8). Отримані експериментальні дані можуть частково спотворюватись наявною похибкою вимірювання та/або зміною навколишніх умов під час тестування ФМ, що призводить до появи шумів та викривлення даних. Перед подальшим аналізом та проведенням розрахунків на їх основі вимірювані експериментальні дані були попередньо оброблені розробленим комплексним алгоритмом фільтрації та апроксимації (див. розд. 3.1).

Типові ВАХ та відповідні графіки потужності зображено на рис. 3.11, основні їх параметри наведені в табл. 3.2.

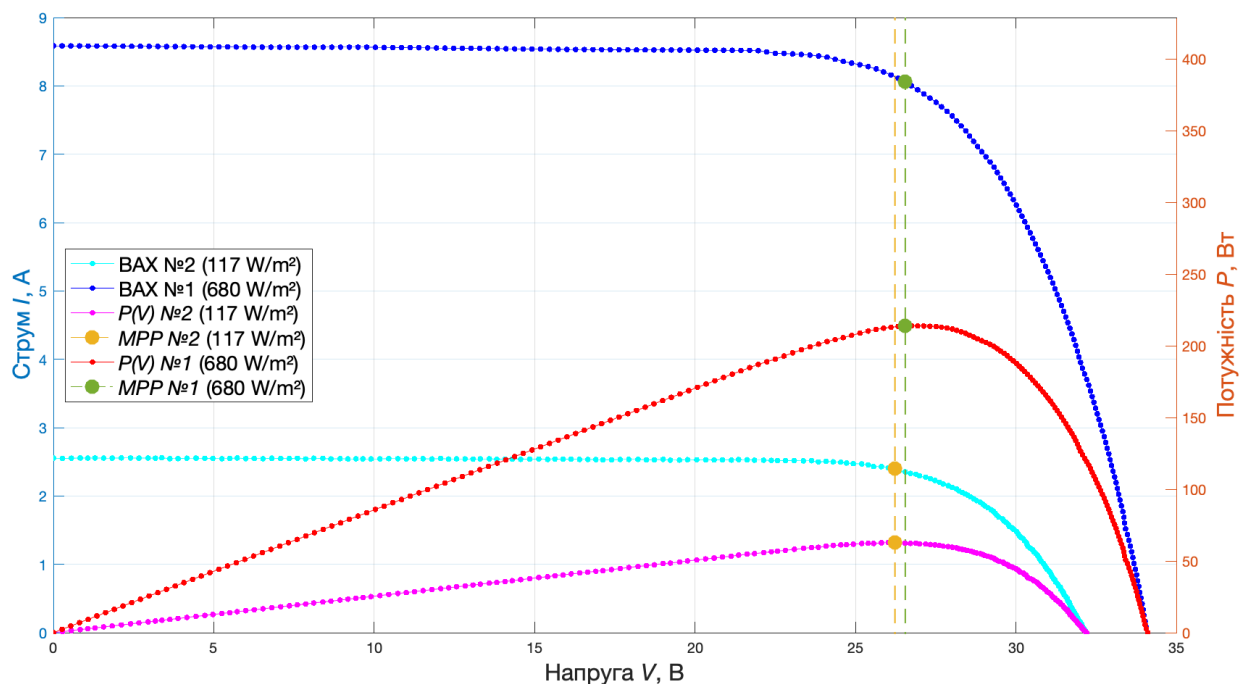


Рисунок 3.11 Типові ВАХ за різної іррадіації

Таблиця 3.2 – Основні параметри типових ВАХ

Параметр	ВАХ № 1 (висока освітленість)	ВАХ № 2 (низька освітленість)
Іррадіація, Вт/м ²	680	117
Температура ФМ, °C	53.17	41.81
MPP, Вт	214	63
Напруга ХХ Voc, В	34.110	32.206
Струм КЗ Isc, А	8.5864	2.5542
Фотострум Iph, А	8.5913	2.5563
Послідовний опір Rs, Ом	0.1993	0.3556
Паралельний опір Rp, Ом	351.98	711.83

Виходячи з однодіодної схеми заміщення (рис. 1.6), струм через діод безпосередньо можна знайти за допомогою експериментальних даних:

$$I_d = I_{ph} - \frac{V}{R_p} - I \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right) \quad (3.30)$$

Оскільки струм через діод відсутній при $V = 0$, то з формули (3.30) оцінка струму фотогенерації I_{ph} через струм КЗ I_{sc} складає:

$$I_{ph} = I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right) \quad (3.31)$$

На основі виразів (3.30) та (3.31) побудовано напівлогарифмічну залежність струму через діод для ВАХ №1, що відображено на рис. 3.12 (чорна лінія). Дана отримана залежність на основі експериментальних вимірів відповідає подібним залежностям в інших наукових роботах (рис. 1.3)

Щоб оцінити залежність фактору ідеальності від напруги в даній роботі ми перейшли від визначення цієї залежності в координатах $V-I$ до залежності в координатах струм – напруга на діоді, тобто V_d-I . Напруга на діоді V_d визначається через експериментальні значення V , I та знайдений раніше відомий послідовний опір R_s :

$$V_d = V + IR_s \quad (3.32)$$

Залежність логарифму струму через діод від напруги на діоді V_d відображено червоною лінією на рис. 3.12.

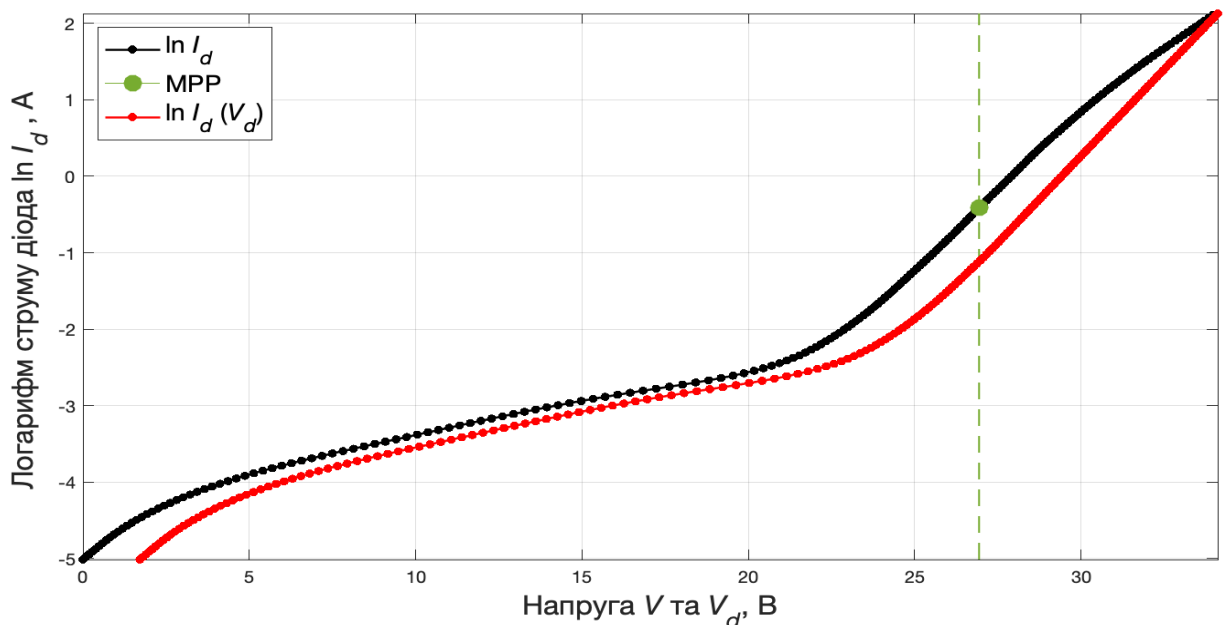


Рисунок 3.12 Струм через діод (ВАХ №1):
від напруги на навантаженні (чорна лінія),
від напруги на діоді (червона лінія),
зелена точка – положення напруги V_{MPP} .

Залежність логарифму діодного струму від нової змінної V_d має лінійний характер в області високої напруги (високий рівень інжекції).

В формулі (3.11) при актуальних значеннях прямої напруги ($V > 0$) можна знехтувати одиницею в порівнянні з експонентою, тоді логарифм струму через діод визначається як:

$$\ln I_d = \ln I_0 + \frac{V + IR_s}{An_s v_T}. \quad (3.33)$$

Для визначення залежності коефіцієнту ідеальності A від напруги на навантаженні продиференціюємо вираз (3.33) за напругою V та отримаємо:

$$A(V) = \frac{1 + R_s \frac{d I}{d V}}{n_s v_T \frac{d \ln I_d}{d V}}. \quad (3.34)$$

Цей вираз використовується при чисельному розрахунку залежності $A(V)$ (рис. 3.13, чорна лінія) після процедури фільтрування даних ВАХ (див. розд. 3.1).

Залежність коефіцієнту ідеальності A від напруги на діоді V_d визначається формулою (3.11) для діодного струму I_d , яку можна записати у логарифмічному вигляді як:

$$\ln I_d = \ln I_0 + \frac{V_d}{An_s v_T}, \quad (3.35)$$

де переходимо від напруги на навантаженні V до напруги на діоді V_d .

Після диференціювання (3.35) за V_d отримуємо вираз для коефіцієнту A через нахил дотичної до логарифмічної кривої діодного струму $\ln I_d (V_d)$:

$$A(V_d) = \frac{1}{n_s v_T \frac{d \ln I_d}{d V_d}}, \quad (3.36)$$

Оцінка коефіцієнту ідеальності за цією формулою дозволяє отримати більш правильні, на наш погляд, значення в області $V > V_{MPP}$ (рис. 3.13, червона лінія).

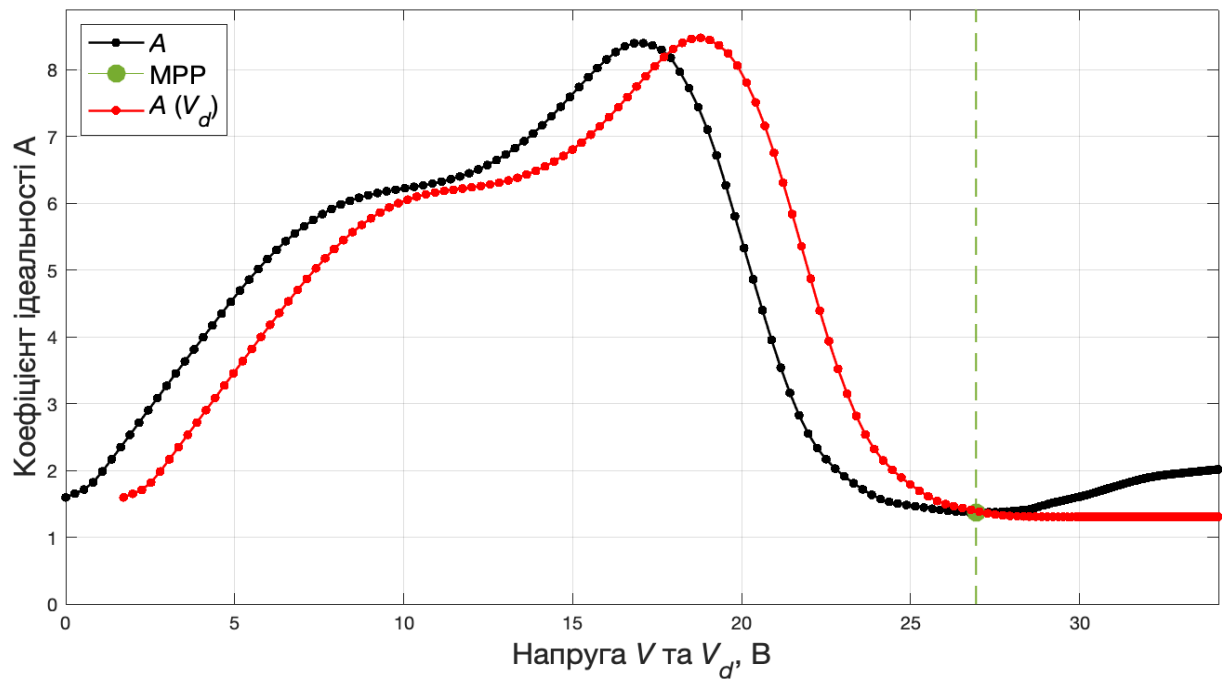


Рисунок 3.13 Коефіцієнт ідеальності (BAX №1):
від напруги на навантаженні (чорна лінія),
від напруги на діоді (червона лінія),
зелена точка – положення напруги V_{MPP} .

Поведінка кривої $\ln I_d(V)$ при великій напрузі нагадує поведінку логарифмічної залежності в моделі SRH [28, 151], однак значення коефіцієнта A в області $V < V_{MPP}$ (точніше < 25 В або 0.42 В на комірку), де може бути суттєвим вплив рекомбінації, відрізняється від значень A класичної моделі в більшу сторону.

Логарифмічну залежність зворотного струму насичення pn -переходу $\ln I_0$ знаходимо у нашому алгоритмі з формул (3.33) і (3.35). Результати розрахунку наведені на рис. 3.14 чорною та червоною кривими відповідно.

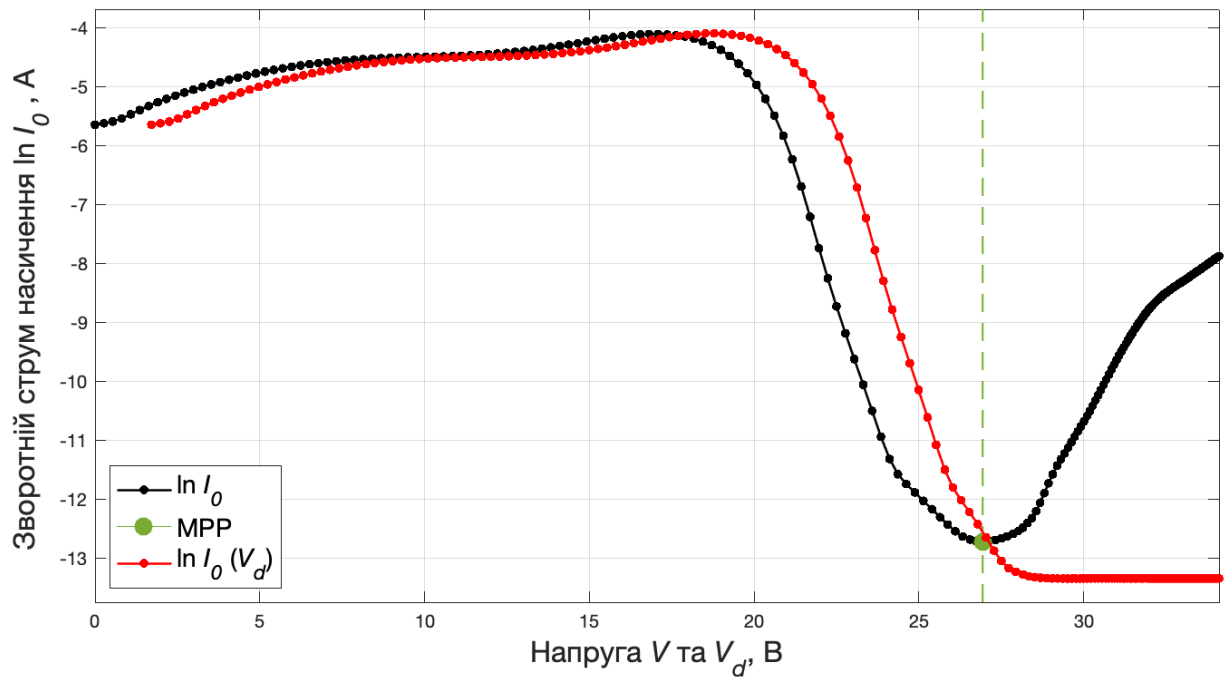


Рисунок 3.14 Зворотний струм насичення діода (ВАХ №1):
від напруги на навантаженні (чорна лінія),
від напруги на діоді (червона лінія),
зелена точка – положення напруги V_{MPP} .

За отриманими змінними параметрами ФМ можна розрахувати ВАХ як рішення нелінійного рівняння на відміну від загальноприйнятого підходу розрахунку [30, 31] модельної ВАХ в результаті підганяння параметрів з постійними значеннями під експериментальні відліки (I, V) . Результатами розрахунків за описаною методикою є модельна ВАХ, приклад якої показаний на рис. 3.15 (синім кольором). Модель демонструє дуже гарний збіг з експериментом.

Для порівняння отриманих результатів з загальноприйнятим підходом виконано моделювання за допомогою 1D моделі ФМ зі сталими параметрами шляхом програмної підгонки параметрів схеми заміщення за критерієм мінімізації цільової функції – середньоквадратичного відхилення RMSE. Результат представлено червоним пунктиром на рис. 3.15.

Похибки моделювання оцінювались за такими критеріями, як звичайне та нормалізоване СКВ, коефіцієнт кореляції R^2 , сума квадратів залишків та середньою абсолютною похибкою, результати їх розрахунків відображено в табл. 3.3.

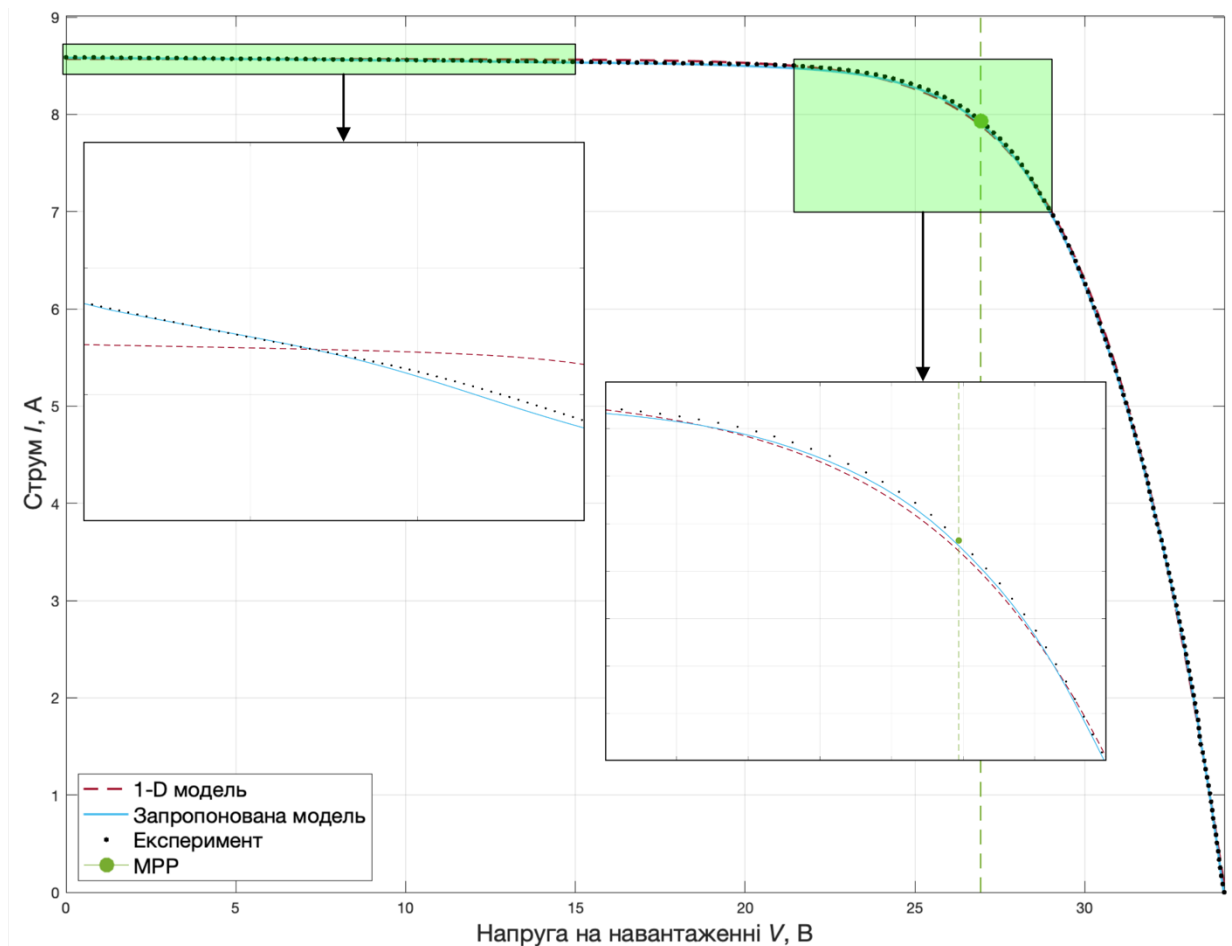


Рисунок 3.15 Модельна ВАХ з урахуванням змінних параметрів (ВАХ №1)

Отримані оцінки демонструють перевагу запропонованої моделі ФЕК, що забезпечує найбільше співпадіння з експериментальними даними та найкраще відповідає реальній поведінці ФЕК.

**Таблиця 3.3 – Статистичні показники моделей ФЕК
(ВАХ №1)**

Методи	RMSE, A	nRMSE	R ²	SSE, A	MAE
<i>1-D модель</i>	0.03150	0.00367	0.99987	0.19840	0.02500
<i>Нова модель</i>	0.01779	0.00207	0.99996	0.06326	0.01549

Для перевірки якості моделювання ВАХ ФМ при різних умовах його роботи виконано аналогічний розрахунок також для ВАХ №2 низького рівня сонячної радіації, що падає на ФМ.

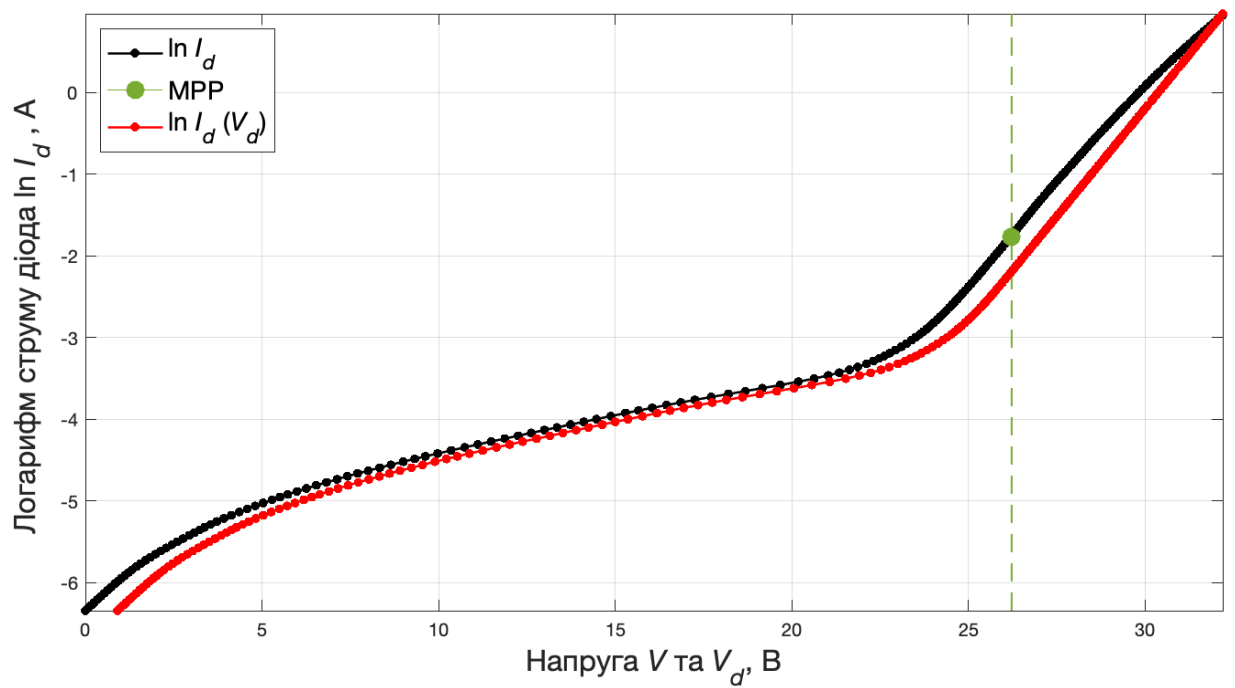


Рисунок 3.16 Струм через діод (ВАХ №2) :
 від напруги на навантаженні (чорна лінія),
 від напруги на діоді (червона лінія),
 зелена точка – положення напруги V_{MPP} .

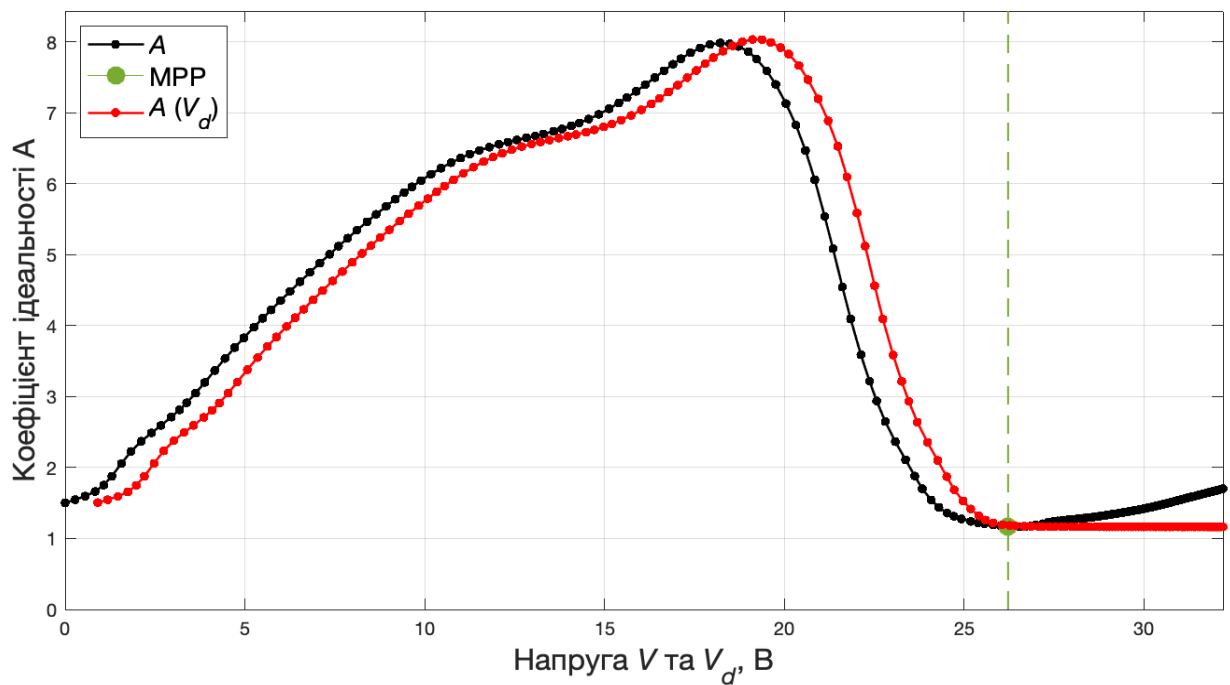


Рисунок 3.17 Коефіцієнт ідеальності (ВАХ №2):
 від напруги на навантаженні (чорна лінія),
 від напруги на діоді (червона лінія),
 зелена точка – положення напруги V_{MPP} .

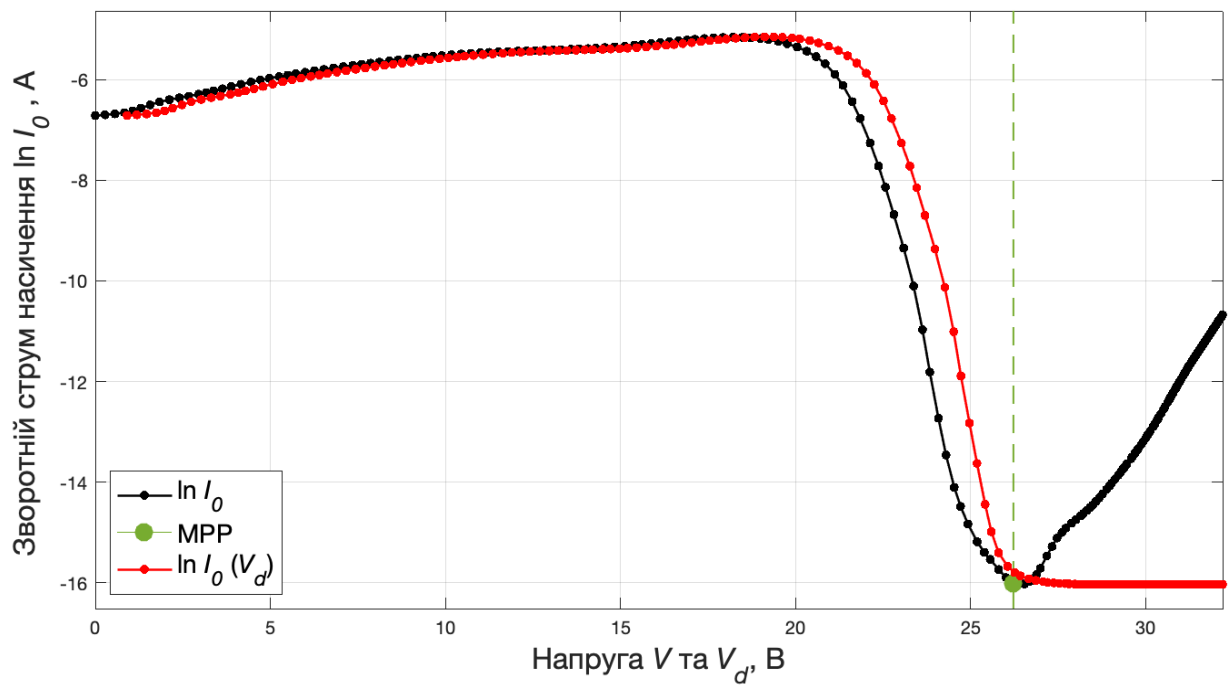


Рисунок 3.18 Зворотний струм насичення діода (ВАХ №2) :
від напруги на навантаженні (чорна лінія),
від напруги на діоді (червона лінія),
зелена точка – положення напруги V_{MPP} .

Статистичні показники моделювання ВАХ №2 (табл. 3.4) демонструють перевагу запропонованого підходу до моделювання ФМ, але при низькому рівні сонячної радіації показують гіршу відповідність експериментальним даним, ніж при високій (табл. 3.3)

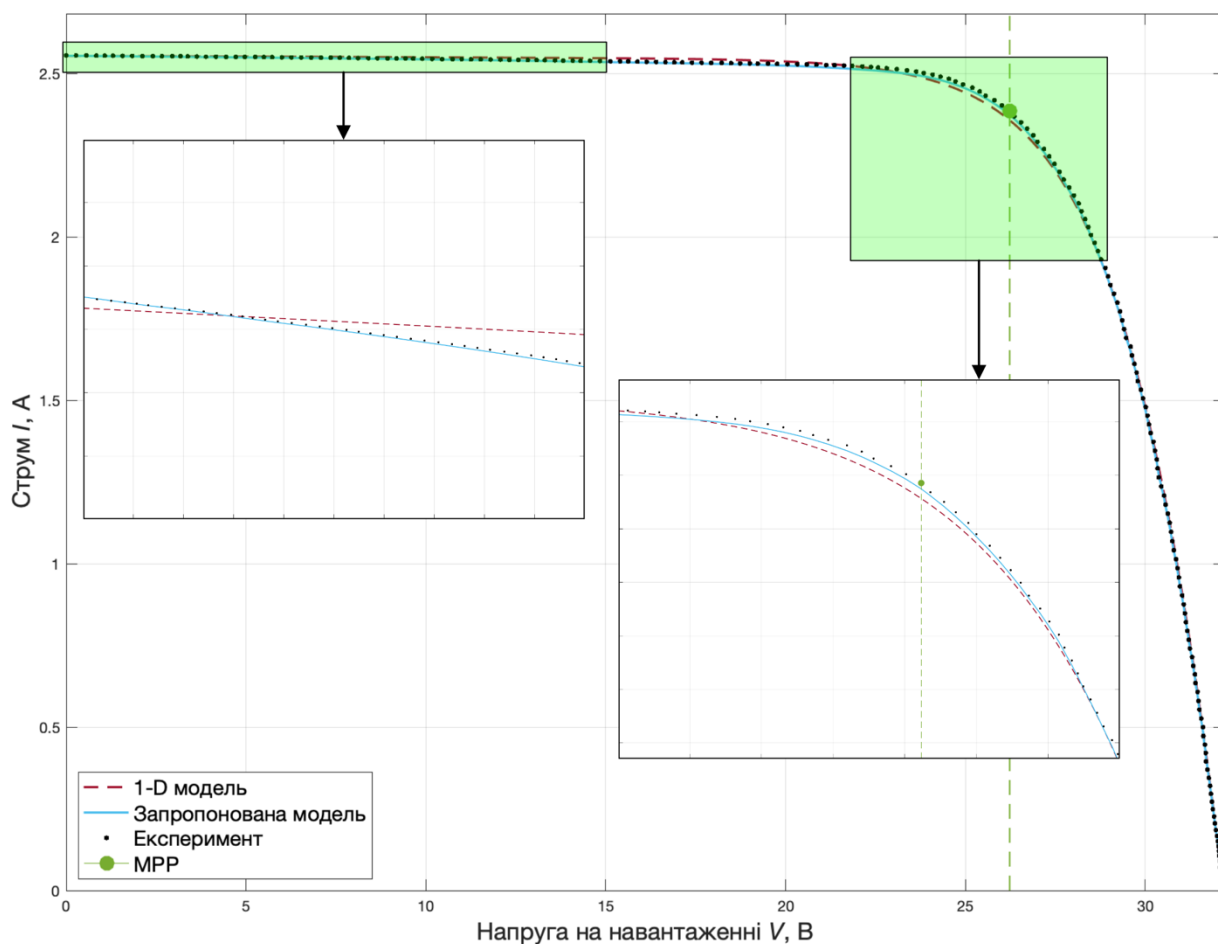


Рисунок 3.19 Модельна ВАХ з урахуванням змінних параметрів (ВАХ №2)

**Таблиця 3.4 – Статистичні показники моделей ФЕК
(ВАХ №2)**

Методи	RMSE, A	nRMSE	R ²	SSE, A	MAE
<i>1-D модель</i>	0.01145	0.00448	0.99982	0.02620	0.00873
<i>Нова модель</i>	0.00670	0.00262	0.99994	0.00898	0.00535

Результати роботи свідчать про сильний вплив рекомбінаційних процесів на фактор ідеальності pn -переходу А сонячних елементів і темновий зворотний струм насичення I_0 . Змінення інтенсивності рекомбінації в широкому діапазоні напруги приводить до суттєвого змінення параметрів A , I_0 з напругою. Тому дуже важливим є врахування цієї залежності параметрів під час моделювання вольт-амперних характеристик ФЕ та ФМ.

Запропонований алгоритм для розрахунку основних параметрів однодіодної схеми заміщення дає змогу визначити їх залежність від напруги на рп-переході. Вперше запропоновано використовувати залежності $A(V)$, $I_0(V)$ під час моделювання ВАХ фотоелектричних генерувальних елементів. Знайдені залежності згодом можуть надати додаткові можливості для тестування нових конструкцій ФМ, а також для діагностики стану модулів, які тривалий час перебувають в експлуатації. Аналіз точності моделювання ВАХ ФМ показує, що врахування залежності $A(V)$, $I_0(V)$ дає точнішу апроксимація ВАХ в області максимальної потужності: саме ця область перегину ВАХ є найпроблемнішою для діодних схем заміщення з постійними параметрами.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальне 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.

Відповідно до поставленої мети, в роботі отримано наступні наукові та практичні результати:

1. Виконано порівняльний аналіз існуючих методів моделювання ФЕ за допомогою еквівалентних схем заміщення, на основі чого визначено наявні аналітичні та метаевристичні підходи до екстракції параметрів ФМ, встановлено основні недоліки сучасних методів моделювання ФЕ, такі як високі вимоги до обчислювальних ресурсів, спрощення складних фізичних процесів у напівпровідниковій структурі *pn*-переходу і, як результат, недостатня відповідність моделі результатам експериментів. Визначено вплив струмів рекомбінації та резистивних втрат в промислових ФМ на формування ВАХ та зміну їх параметрів від напруги ФМ;
2. Обґрунтовано, розроблено та виготовлено автономну автоматизовану систему вимірювання ВАХ ФМ в польових умовах (на основі мікрокомп'ютера Raspberry Pi). Визначені особливості процесу вимірювання ВАХ ФМ, такі як допустима швидкість зняття ВАХ, що склала від 50 до 500 мс., при необхідній кількості відліків близько 200, обрано оптимальну конфігурацію навантажувальної частини, спроектовано та виготовлено основні складові вимірювальної системи, розроблено необхідне програмне забезпечення, отримано та проаналізовано більше тисячі експериментальних вимірів;

3. Розроблено комплексний адаптивний алгоритм фільтрації даних на основі ковзних медіанних та двоетапної апроксимації експериментальних ВАХ ФМ, що дозволяє враховувати особливості роботи ФМ, тим самим забезпечуючи кращу якість обробки експериментальних даних для подальших розрахунків та аналізу. Даний алгоритм забезпечує точність на рівні $nRMSE = 0.00120$ та $R^2 = 0.99999$, демонструє найбільше співпадіння з експериментальними даними в порівнянні з такими популярними методами, як Loess, Spline, фільтр Савіцького-Голая, та дозволяє забезпечити достатній рівень точності усунення інструментальних і радіаційних шумів та кореляції з експериментальними даними ВАХ ФМ;
4. Отримані аналітичні залежності, які дозволяють при визначенні параметрів ФМ розділити вплив електричних втрат (послідовного опору) та рекомбінаційних процесів (фактору ідеальності та зворотного струму) на формування ВАХ;
5. Розроблено теоретичну модель та алгоритм для визначення параметрів ФМ при різних зовнішніх умовах сонячної радіації та температури. Визначено аналітичні залежності параметрів ФМ від напруги, а саме фактору ідеальності та зворотного струму насичення, які дозволяють аналізувати особливості процесів рекомбінації носіїв;
6. Показано, що послідовний опір резистивних втрат не залежить від рівня сонячної радіації, що потрапляє на ФМ. Визначено, що в області прямої напруги нижче точки максимальної потужності коефіцієнт ідеальності A може значно перевищувати 2, що пов'язано з рекомбінацією на мікроструктурних та поверхневих дефектах сучасних промислових ФМ;
7. Розроблено методику та програмне забезпечення, що дозволило вперше застосувати запропоновану однодіодну модель ФЕ зі змінними параметрами та їхніми залежностями від напруги для опису ВАХ ФМ на відміну від загальноприйнятого використання двох- або трьохдіодних моделей з фіксованими параметрами. Останні засновані на суперпозиції

діодних струмів і не відображають складного фізичного характеру формування струму в фотоелектричних елементах. Подібний підхід було перевірено на експериментально отриманих ВАХ як при високій сонячній радіації, так при низькій, і в результаті отримано значення $nRMSE$ на рівні 0.002-0.0027 та R^2 не нижче 0.99994, що перевершує статистичні показники однодіодної моделі ФМ з фіксованими параметрами.

Результати дисертаційного дослідження передано для використання у навчальному процесі та наукових дослідженнях кафедри відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при проведенні лекційних занять, практичних та лабораторних робіт з дисциплін «Фотоенергетика» та «Фотоелектричні станції» (бакалаврський рівень), у дипломному проектуванні за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, та до Інституту відновлюваної енергетики НАН України при виконанні науково-дослідних робіт з шифром «Комплекс-3» (ДР № 0118U003385) та «Комплекс-Інтегро» (ДР № 0123U100782).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. S.M. Sze and M.-K. Lee, *Semiconductor devices: Physics and technology*, 3rd ed. Chichester, England: John Wiley & Sons, 2012, 592 p., ISBN: 978-0-470-53794-7
2. D. Jaiswal, M. Mittal, and V. Mittal, “A review on Solar PV cell and its evolution”, *Latest trends in renewable energy technologies: Select proceedings of NCRESE 2020 (Lecture Notes in Electrical Engineering)*, pp. 303–313, Jan. 2021, doi: 10.1007/978-981-16-1186-5_26.
3. S. Vadhera, B. S. Umre, and A. Kalam, Eds., *Latest trends in renewable energy technologies: Select proceedings of NCRESE 2020 (Lecture Notes in Electrical Engineering)*, 2021st ed. Singapore: Springer, 2021, vol. 760, pp. 303–313, ISBN: 978-9811611858
4. M. A. Green, *Solar cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*. Prentice Hall: Hoboken, NJ, USA, 1982, 274 p., ISBN: 978-0138222703
5. M. A. Green, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, and A. W. Y. Ho-Baillie, “Solar cell efficiency tables (version 54)”, *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, vol. 27, no. 7, pp. 565–575, Jun. 2019, doi: 10.1002/pip.3171
6. J. Li, A. Aierken, Y. Liu, Y. Zhuang, X. Yang, J. H. Mo, R. K. Fan, Q. Y. Chen, S. Y. Zhang, Y. M. Huang, Q. Zhang, “A brief review of High efficiency III-V solar cells for space application”, *Frontiers in Physics*, vol. 8, Feb. 2021, doi: 10.3389/fphy.2020.631925.
7. K. Tanabe, “A review of ultrahigh efficiency III-V semiconductor compound solar cells: multijunction tandem, lower dimensional, photonic Up/Down conversion and plasmonic nanometallic structures”, *Energies*, vol. 2, no. 3, pp. 504–530, Jul. 2009, doi: 10.3390/en20300504.
8. R. A. Senthil, J. Theerthagiri, S. K. K. Pasha, M. Jagannathan, A. N. Grace, and S. Manickam, “Multijunction solar cells based on III–V and II–VI

- semiconductors”, *Oxide Free Nanomaterials for Energy Storage and Conversion Applications*, 2022, pp. 307–328, doi: 10.1016/b978-0-12-823936-0.00009-7.
9. J. Ramanujam, D.M. Bishop, T.K. Todorov, “Flexible CIGS, CdTe and a-Si:H based thin film solar cells: A review”, *Progress in Materials Science*, vol. 110, p. 100619, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.pmatsci.2019.100619.
 10. A. Machín and F. Márquez, “Advancements in photovoltaic cell materials: silicon, organic, and perovskite solar cells”, *Materials*, vol. 17, no. 5, p. 1165, Mar. 2024, doi: 10.3390/ma17051165.
 11. T. A. Chowdhury, Md. A. B. Zafar, Md. S.-U. Islam, M. Shahinuzzaman, M. A. Islam, and M. U. Khandaker, “Stability of perovskite solar cells: issues and prospects”, *RSC Advances*, vol. 13, no. 3, pp. 1787–1810, Jan. 2023, doi: 10.1039/d2ra05903g.
 12. S. Liu, V. P. Biju, Y. Qi, W. Chen, and Z. Liu, “Recent progress in the development of high-efficiency inverted perovskite solar cells”, *NPG Asia Materials*, vol. 15, no. 27, May 2023, doi: 10.1038/s41427-023-00474-z.
 13. G. Dastgeer, S. Nisar, M. W. Zulfiqar, J. Eom, M. Imran, and K. Akbar, “A review on recent progress and Challenges in High-Efficiency Perovskite Solar Cells”, *Nano Energy*, vol. 132, p. 110401, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.nanoen.2024.110401.
 14. J. Svarc, “Solar PV cell construction – Clean Energy Reviews” [Online], *Clean Energy Reviews*, Feb. 2022, Available: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-pv-cell-construction>.
 15. О.Ю. Гаєвський, “Фотоенергетика. Частина I. Сонячна радіація і фотоелектричні модулі”, підручник для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023, 150 с., Доступно: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/58361>.
 16. S. W. Glunz, R. Preu, and D. Biro, “Crystalline silicon solar cells: State-of-the-Art and Future Developments”, *Comprehensive Renewable Energy*, 2012, pp. 353–387, doi: 10.1016/b978-0-08-087872-0.00117-7.

17. A. W. Blakers, A. Wang, A. M. Milne, J. Zhao, and M. A. Green, “22.8% efficient silicon solar cell”, *Applied Physics Letters*, vol. 55, no. 13, pp. 1363–1365, Sep. 1989, doi: 10.1063/1.101596.
18. M. A. Green, “The Passivated Emitter and Rear Cell (PERC): From conception to mass production”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 143, pp. 190–197, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.solmat.2015.06.055.
19. J. Zhao, A. Wang, and M. A. Green, “24% efficient PERL structure silicon solar cells,” *IEEE Conference on Photovoltaic Specialists*, Kissimmee, FL, USA, 1990, vol. 1, pp. 333–335, doi: 10.1109/pvsc.1990.111642.
20. J. Zhao, A. Wang, P. Altermatt, S. Wenham, and M. Green, “24% efficient perl silicon solar cell: Recent improvements in high efficiency silicon cell research”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 41–42, pp. 87–99, Jun. 1996, doi: 10.1016/0927-0248(95)00117-4.
21. S.N. Vodapally and M.H. Ali, “A comprehensive review of Solar photovoltaic (PV) technologies, architecture, and its applications to improved efficiency”, *Energies*, vol. 16, no. 1, p. 319, Dec. 2023, doi: 10.3390/en16010319.
22. J. Zhao, A. Wang, and M.A. Green, “High-efficiency PERL and PERT silicon solar cells on FZ and MCZ substrates”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 65, no. 1–4, pp. 429–435, Jan. 2001, doi: 10.1016/s0927-0248(00)00123-9.
23. M.A. Green, E.D. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, K. Bothe, D. Hinken, M. Rauer, X. Hao, “Solar cell efficiency tables (Version 60)”, *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, vol. 30, no. 7, pp. 687–701, Jun. 2022, doi: 10.1002/pip.3595.
24. R. Guerrero-Lemus, R. Vega, T. Kim, A. Kimm, and L. E. Shephard, “Bifacial solar photovoltaics – A technology review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 1533–1549, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.03.041.
25. S. M. Sze and K. K. Ng, *Physics of semiconductor Devices*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, New Jersey 2006. ISBN: 978-0471143239.
26. D. A. Neamen, *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles*. McGraw-Hill Education, 2012, ISBN: 978-0071089029.

- 27.W. Shockley, “The theory of P-N Junctions in semiconductors and P-N Junction transistors”, *Bell System Technical Journal*, vol. 28, no. 3, pp. 435–489, Jul. 1949, doi: 10.1002/j.1538-7305.1949.tb03645.x.
- 28.W. Shockley and W. T. Read, “Statistics of the recombinations of holes and electrons”, *Physical Review*, vol. 87, no. 5, pp. 835–842, Sep. 1952, doi: 10.1103/physrev.87.835.
- 29.R. N. Hall, “Electron-Hole recombination in Germanium”, *Physical Review*, vol. 87, no. 2, p. 387, Jul. 1952, doi: 10.1103/physrev.87.387.
- 30.M. Paulescu, V. Badescu, and C. Dughir, “New procedure and field-tests to assess photovoltaic module performance”, *Energy*, vol. 70, pp. 49–57, June 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.03.085.
- 31.K. Lappalainen, P. Manganiello, M. Piliougine, G. Spagnuolo, and S. Valkealahti, “Virtual sensing of photovoltaic module operating parameters”, *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 10, no. 3, pp. 852–862, Feb. 2020, doi: 10.1109/jphotov.2020.2972688.
- 32.S. Bader, X. Ma, and B. Oelmann, “A comparison of One- and Two-Diode model parameters at indoor illumination levels”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 172057–172064, Jan. 2020, doi: 10.1109/access.2020.3025146.
- 33.J. C. H. Phang, D. S. H. Chan, and J. R. Phillips, “Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters”, *Electronics Letters*, vol. 20, no. 10, pp. 406–408, May 1984, doi: 10.1049/el:19840281.
- 34.H. Can and D. Ickilli, “Parameter estimation in modeling of photovoltaic panels based on datasheet values”, *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 136, no. 2, Aug. 2013, doi: 10.1115/1.4024923.
- 35.H. Ibrahim and N. Anani, “Evaluation of Analytical Methods for Parameter Extraction of PV modules”, *Energy Procedia*, vol. 134, pp. 69–78, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.601.
- 36.C. Carrero, D. Ramírez, J. Rodríguez, and C. A. Platero, “Accurate and fast convergence method for parameter estimation of PV generators based on three

- main points of the I–V curve”, *Renewable Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 2972–2977, May 2011, doi: 10.1016/j.renene.2011.04.001.
- 37.R. Abbassi, A. Boudjemline, A. Abbassi, A. Torchani, H. Gasmi, and T. Guesmi, “A Numerical-Analytical hybrid approach for the identification of SDM solar cell unknown parameters”, *Engineering Technology & Applied Science Research*, vol. 8, no. 3, pp. 2907–2913, Jun. 2018, doi: 10.48084/etasr.2027.
 - 38.W. De Soto, S. A. Klein, and W. A. Beckman, “Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance”, *Solar Energy*, vol. 80, no. 1, pp. 78–88, Aug. 2005, doi: 10.1016/j.solener.2005.06.010.
 - 39.E. I. Batzelis and S. A. Papathanassiou, “A method for the analytical extraction of the Single-Diode PV model parameters”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 504–512, Dec. 2015, doi: 10.1109/tste.2015.2503435.
 - 40.Q. X. Jia, K. Ebihara, and T. Ikegami, “Analytical solution for solar cell model parameters from illuminated current-voltage characteristics”, *Philosophical Magazine B*, vol. 72, no. 4, pp. 375–382, Oct. 1995, doi: 10.1080/13642819508239092.
 - 41.M. Chegaar, Z. Ouennoughi, F. Guechi, and H. Langueur, “Determination of solar cells parameters under illuminated conditions”, *Journal of Electron Devices*, vol. 2, pp. 17-21, 2003, doi:10.5370/KIEE/2013/62/3/371
 - 42.A. Ortizconde, F. Garciasanchez, and J. Muci, “New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated characteristics,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, no. 3, pp. 352–361, Jun. 2005, doi: 10.1016/j.solmat.2005.04.023.
 - 43.A. Gaevskii, “PV module parameters determination based on accurate development of volt-ampere characteristics”, *Vidnovluvana energetika*, vol. 4, pp. 32-39, 2012, available: jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0000797764.
 - 44.C. Zhang, J. Zhang, Y. Hao, Z. Lin, and C. Zhu, “A simple and efficient solar cell parameter extraction method from a single current-voltage curve,” *Journal of Applied Physics*, vol. 110, no. 6, Sep. 2011, doi: 10.1063/1.3632971.

- 45.A. Gaevskii, "Method for Determining Parameters of PV Modules in Field Conditions", *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems*, pp. 205–208, Apr. 2019, doi: 10.1109/ess.2019.8764239.
- 46.B. Maniraj and A. P. Fathima, "Parameter extraction of solar photovoltaic modules using various optimization techniques: a review", *Journal of Physics Conference Series*, vol. 1716, no. 1, p. 012001, Dec. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1716/1/012001.
- 47.J. A. Jervase, H. Bourdoucen, and A. Al-Lawati, "Solar cell parameter extraction using genetic algorithms", *Measurement Science and Technology*, vol. 12, no. 11, pp. 1922–1925, Oct. 2001, doi: 10.1088/0957-0233/12/11/322.
- 48.M. Ye, X. Wang, and Y. Xu, "Parameter extraction of solar cells using particle swarm optimization", *Journal of Applied Physics*, vol. 105, no. 9, May 2009, doi: 10.1063/1.3122082.
- 49.D. B. Hmamou et al., "Particle swarm optimization approach to determine all parameters of the photovoltaic cell", *Materials Today Proceedings*, vol. 52, pp. 7–12, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.10.083.
- 50.M. Demirtas and K. Koc, "Parameter extraction of photovoltaic cells and modules by INFO Algorithm", *IEEE Access*, vol. 10, pp. 87022–87052, Jan. 2022, doi: 10.1109/access.2022.3198987.
- 51.H. Bakır, "Comparative performance analysis of metaheuristic search algorithms in parameter extraction for various solar cell models", *Environmental Challenges*, vol. 11, p. 100720, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.envc.2023.100720.
- 52.Z. Gu, G. Xiong, and X. Fu, "Parameter Extraction of Solar Photovoltaic Cell and Module Models with Metaheuristic Algorithms: A Review", *Sustainability*, vol. 15, no. 4, p. 3312, Feb. 2023, doi: 10.3390/su15043312.
- 53.M. R. Ranga, V. RaoBathina, and S. Kotni, "A review of solar cell parameters extraction using metaheuristic optimization methods based on various diode models", *2024 International Conference on Computational Intelligence for Green and Sustainable Technologies (ICCIGST)*, pp. 1–6, Jul. 2024, doi: 10.1109/iccigst60741.2024.10717470.

54. L. M. P. Deotti, J. L. R. Pereira, and I. C. Da Silva Júnior, "Parameter extraction of photovoltaic models using an enhanced Lévy flight bat algorithm", *Energy Conversion and Management*, vol. 221, p. 113114, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113114.
55. A. Fathy and H. Rezk, "Parameter estimation of photovoltaic system using imperialist competitive algorithm", *Renewable Energy*, vol. 111, pp. 307–320, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.04.014.
56. E. E. Ali, M. A. El-Hameed, A. A. El-Fergany, and M. M. El-Arini, "Parameter extraction of photovoltaic generating units using multi-verse optimizer", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 17, pp. 68–76, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.seta.2016.08.004.
57. *BERGER Lichttechnik HISTORY* [Online]. Available: www.bergerlichttechnik.de
58. *The Daystar Solar meter* [Online]. Available: raydec.com
59. *EKO Instruments Trading* [Online]. Available: www.eko-instruments.com
60. *The Eppley Laboratory* [Online]. Available: www.eppleylab.com
61. *Photo Emission Tech* [Online]. Available: photoemission.com
62. *PV Measurements* [Online]. Available: pvmeasurements.com
63. *Spectrolab* [Online]. Available: www.spectrolab.com
64. *Seaward PV200* [Online]. Available: www.seaward.com/gb/products/solar/solar-pv-testers/389a915-pv200-complete-kit/
65. *Meco Solar Module Analyzer* [Online]. Available: www.mecoinst.com/meco-product-details/Solar-Module-Analyzer.aspx
66. *MP-11 I-V Checker* [Online]. Available: www.eko-instruments.com/eu/categories/products/i-v-measurement-instruments/mp-11-portable-i-v-checker
67. *Eko Rack Mountable I-V Tracer* [Online]. Available: www.eko-instruments.com/cn/categories/products/iv-measurement-instruments/mp-160-i-v-tracer
68. *Togami PV Doctor* [Online]. Available: [www.togami-elec.co.jp/en/pdf/C0234c\(PV_Doctor\).pdf](http://www.togami-elec.co.jp/en/pdf/C0234c(PV_Doctor).pdf)

- 69.E. Duran, J. Galan, M. Sidrach-De-Cardona, and F. Segura, "An application of interleaved DC-DC converters to obtain I-V characteristic curves of photovoltaic modules", *2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, pp. 2284–2289, Nov. 2008, doi: 10.1109/iecon.2008.4758313.
- 70.Z. Hameiri and K. R. McIntosh, "On the use of local ideality factor obtained from effective carrier lifetime measurements", *2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Jun. 2013, doi: 10.1109/pvsc.2013.6744408.
- 71.C. W. Riley and L. M. Tolbert, "An online autonomous I-V tracer for PV monitoring applications", *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1–5, Jul. 2015, doi: 10.1109/pesgm.2015.7286146.
- 72.M. H. Qais, H. M. Hasanien, S. Alghuwainem, K. H. Loo, M. A. Elgendy, and R. A. Turkey, "Accurate Three-Diode model estimation of Photovoltaic modules using a novel circle search algorithm", *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 13, no. 3, p. 101824, May 2022, doi: 10.1016/j.asej.2022.101824.
- 73.F. Spertino, J. Ahmad, A. Ciocia, P. Di Leo, A. F. Murtaza, and M. Chiaberge, "Capacitor charging method for I–V curve tracer and MPPT in photovoltaic systems", *Solar Energy*, vol. 119, pp. 461–473, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.solener.2015.06.032.
- 74.A. M. Humada, M. Hojabri, S. Mekhilef, and H. M. Hamada, "Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 494–509, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.051.
- 75.M. Almaktar, H. A. Rahman, and M. Y. Hassan, "Effect of losses resistances, module temperature variation, and partial shading on PV output power", *2012 IEEE International Conference Power and Energy*, pp. 360–365, Dec. 2012, doi: 10.1109/pecon.2012.6450238.
- 76.I. Caluianu, G. Notton, I. Colda, S. Caluianu, and A. Damian, "Photovoltaic energy generation under partially shading conditions", *8th Int. Symp. On Advanced Electromechanical Motion Systems & Electric Drives Joint Symp*, Jul. 2009, doi: 10.1109/electromotion.2009.5259110.

- 77.A. Dolara, G. C. Lazaroiu, S. Leva, and G. Manzolini, “Experimental investigation of partial shading scenarios on PV (photovoltaic) modules”, *Energy*, vol. 55, pp. 466–475, May 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.04.009.
- 78.J. Ahmed and Z. Salam, “A critical evaluation on maximum power point tracking methods for partial shading in PV systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 47, pp. 933–953, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.03.080.
- 79.S. Silvestre and A. Chouder, “Shading effects in characteristic parameters of PV modules”, *Spanish Conference on Electron Devices*, pp. 116–118, Jan. 2007, doi: 10.1109/sced.2007.384007.
- 80.A. J. Hanson, C. A. Deline, S. M. MacAlpine, J. T. Staath, and C. R. Sullivan, “Partial-Shading assessment of photovoltaic installations via Module-Level monitoring”, *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, no. 6, pp. 1618–1624, Sep. 2014, doi: 10.1109/jphotov.2014.2351623.
- 81.R. Ramaprabha and B.L. Mathur, “Impact of partial shading on solar PV module containing series connected cells”, *International Journal of Recent Trends in Engineering*, vol. 2(7), pp. 56– 60, 2009
- 82.E. Duran, M. Piliougine, M. Sidrach-De-Cardona, J. Galan, and J. M. Andujar, “Different methods to obtain the I-V curve of PV modules: A review”, *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 1–6, May 2008, doi: 10.1109/pvsc.2008.4922578.
- 83.A. Q. Malik and S. J. B. H. Damit, “Outdoor testing of single crystal silicon solar cells”, *Renewable Energy*, vol. 28, no. 9, pp. 1433–1445, Feb. 2003, doi: 10.1016/s0960-1481(02)00255-0.
- 84.E. E. Van Dyk, A. R. Gxasheka, and E. L. Meyer, “Monitoring current-voltage characteristics of photovoltaic modules”, *2002 Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 1516–1519, Oct. 2003, doi: 10.1109/pvsc.2002.1190899.
- 85.M. M. Mahmoud, “Transient analysis of a PV power generator charging a capacitor for measurement of the I–V characteristics”, *Renewable Energy*, vol. 31, no. 13, pp. 2198–2206, Nov. 2005, doi: 10.1016/j.renene.2005.09.019.

- 86.Y. Kuai and S. Yuvarajan, “An electronic load for testing photovoltaic panels”, *Journal of Power Sources*, vol. 154, no. 1, pp. 308–313, Jun. 2005, doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.04.016.
- 87.M.G. Gunvench, C. Gurcan, K. Durgin and D. MacDonald. “Solar simulator and I-V measurement system for large area solar cell testing”, *Proceedings of the 2004 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition*, Jan 2004.
- 88.M. A. De Blas, J. L. Torres, E. Prieto, and A. García, “Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices”, *Renewable Energy*, vol. 25, no. 3, pp. 371–380, Mar. 2002, doi: 10.1016/s0960-1481(01)00056-8.
- 89.J. M. Andújar, J. M. E. Gómez, E. Durán and M. Á. M. Bohórquez, “Automatic generation system for I-V curves and monitoring of PV modules” (in Spanish), *XXV Jornadas de Automática*, p. 65, 2004.
- 90.J. M. Enrique, E. Duran, N. S.-D.-C. M, J. M. Andujar, M. A. Bohorquez, and J. Carretero, “A new approach to obtain I-V and P-V curves of photovoltaic modules by using DC-DC converters”, *2005 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 1769–1772, Aug. 2005, doi: 10.1109/pvsc.2005.1488493.
- 91.E. Duran, J. Galan, M. Sidrach-De-Cardona and J. M. Andujar, “A New Application of the Buck-Boost-Derived Converters to Obtain the I-V Curve of Photovoltaic Modules”, *2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Jan. 2007, doi: 10.1109/pesc.2007.4342022.
- 92.I. J. Bahl, *Lumped elements for RF and microwave circuits*. Artech House, 2003.
- 93.C. Monokroussos, R. Gottschalg, A. N. Tiwari, G. Friesen, D. Chianese, and S. Mau, “The Effects of Solar Cell Capacitance on Calibration Accuracy When using a Flash Simulator”, *IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, vol. 48, pp. 2231–2234, Jan. 2006, doi: 10.1109/wcpec.2006.279953.
- 94.N. Taylor, *Guidelines for PV Power Measurements in Industry*, European Commission Joint Research Centre, Jan. 2010, ISBN: 978-92-79-15780-6

95. G. Friesen and H. A. Ossenbrink, "Capacitance effects in high-efficiency cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 48, no. 1–4, pp. 77–83, Nov. 1997, doi: 10.1016/s0927-0248(97)00072-x.
96. *Electrolytic Aluminum Capacitor Hitachi 100V 22000UF* [Online]. Available: <http://us.100y.com.tw/viewproduct.asp?MNo=112994>
97. *Aluminum housed resistors AH25WJ-100R* [Online]. Available: www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/AH_20160101-Hitano-datasheet.pdf
98. *Analog-to-digital converters ADS1256 24-Bit, 30kSPS, 8-Ch Delta-Sigma With PGA* [Online]. Available: www.ti.com/product/ADS1256
99. *Raspberry Pi High-Precision AD/DA Expansion Board* [Online]. Available: www.waveshare.com/wiki/High-Precision_AD/DA_Board
100. *Raspberry serial peripheral interface* [Online]. Available: www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html#spi-overview
101. *Allegro MicroSystems Current Sensor ACS713ELCTR-20A-T* [Online]. Available: https://eu.mouser.com/datasheet/2/1115/ACS713_Datasheet-3178884.pdf
102. *Keysight Oscilloscope DSOX1102G* [Online]. Available: www.keysight.com/us/en/product/DSOX1102G/oscilloscope-70-100-mhz-2-analog-channels.html
103. *Zener Diode BZX85-C5V1 YJ* [Online]. Available: www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/BZX85C.pdf
104. *Rhode&Schwarz Digital multimeter HMC8012* [Online]. Available: www.rohde-schwarz.com/ua/products/test-and-measurement/rs-essentials-meters-and-analyzers/rs-hmc8012-digital-multimeter_63493-44315.html
105. *Maxim Integrated 1-Wire Digital Thermometer DS18B20+* [Online]. Available: www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/DS18B20-28978.pdf
106. *Kipp&Zonen Pyranometer SP Lite 2* [Online]. Available: www.kippzonen.com/Product/9/SP-Lite2-Pyranometer

107. *International Rectifier Power MOSFET IRFB4510PbF* [Online]. Available: www.infineon.com/dgdl/irfb4510pbf.pdf?fileId=5546d462533600a40153561651d81e40
108. *International Rectifier Dual low side MOSFET driver IR4427SPBF* [Online]. Available: www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/ir4426-1227178.pdf
109. *Online PCB design and circuit simulator* [Online]. Available: www.easyeda.com
110. *Сервіс з експрес виробництва друкованих плат PCB24* [Online]. Available: www.pcb24.com.ua
111. *Single-board microcomputer Raspberry Pi 4 Model B* [Online]. Available: www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/
112. *Raspberry Pi 7" Touch Screen TFT Display* [Online]. Available: www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-touch-display/
113. *High-level, general-purpose programming language Python* [Online]. Available: www.python.org
114. *Lithium battery Samsung INR 18650 29E 2900 mAh* [Online]. Available: www.batterex.com.ua/rechargeable-batteries/18650_batteries/18650_samsung_29e_inr18650-29e_2900mah
115. *BMS protection board 4S 20A HX-4S-D20* [Online]. Available: www.batterex.com.ua/ru/rechargeable-batteries/battery_accessories/bms-protection-boards/bms-hx-4s-d20-protection-board
116. *Step-down regulated DC-DC converter XL4016* [Online]. Available: www.arduino.ua/prod1484-ponijaushhii-preobrazovatel-9a-s-regylirovkoi-toka-i-napryajeniya
117. *Real Time Clock DS3231M* [Online]. Available: www.arduino.ua/prod2891-real-time-clock-modyl-na-ds3231m?srsltid=AfmBOoqA5nroTltvnGxV_58x7Jp6xTA5fldyQG1Ptx_27v8uEZ-yL0FU
118. *The Remote Connectivity Software TeamViewer* [Online]. Available: www.teamviewer.com/en/

119. *The Secure Shell (SSH) Connection Protocol* [Online]. Available: datatracker.ietf.org/doc/html/rfc4254
120. *Virtual private network OpenVPN* [Online]. Available: www.openvpn.net
121. *Maxim Integrated 1-Wire Bus* [Online]. Available: www.analog.com/en/product-category/1wire-devices.html
122. *Resettable fuse Littelfuse PolySwitch 30R400UF* [Online]. Available: www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/littelfuse_seria_30r.pdf
123. *Suppressor ST SMBJ5.0A-TR* [Online]. Available: www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/smbj-955195.pdf
124. *International Rectifier Power MOSFET IRLML6244TRPBF* [Online]. Available: www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/irlml6244pbf-datasheet.pdf
125. *High performance polycrystalline PV module Risen RSM60-6-280P* [Online]. Available: www.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/29989
126. *Monocrystalline PV module Kvazar KV-100* [Online]. Available: kvazar7.com/ua/p192338127-solnechnaya-batareya-10012m.html
127. *Monocrystalline PV module SunRise SR-M536100* [Online]. Available: www.renugen.co.uk/content/Solar_Panel_Brochures_part_4/Solar%20Panel%20Brochures%20part%204/sunrise_brochure/sunrise_sr-m536_85-100_watt_solar_panel_module_-_renugen.co.uk.pdf
128. *Monocrystalline PV module JA Solar JAM72D30-555* [Online]. Available: www.jasolar.com/uploadfile/2023/0606/20230606014716302.pdf
129. W. S. Cleveland, “Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots”, *Journal of the American Statistical Association*, vol. 74, no. 368, pp. 829–836, Dec. 1979, doi: 10.1080/01621459.1979.10481038.
130. V. P. Kostylyov, A. V. Sachenko, M. Evstigneev, I. O. Sokolovskyi, and A. I. Shkrebtii, “Characterization and optimization of high-efficiency crystalline silicon solar cells: Impact of recombination in the space charge region and trap-assisted Auger exciton recombination”, *Journal of Applied Physics*, vol. 137, no. 2, Jan. 2025, doi: 10.1063/5.0239369.

131. A. Augusto, S. Y. Herasimenka, R. R. King, S. G. Bowden, and C. Honsberg, “Analysis of the recombination mechanisms of a silicon solar cell with low bandgap-voltage offset”, *Journal of Applied Physics*, vol. 121, no. 20, May 2017, doi: 10.1063/1.4984071.
132. A.V. Sachenko, V.P. Kostylyov, V.M. Vlasiuk, I.O. Sokolovskyi, M. Evstigneev, D.F. Dvernikov, R.M. Korkishko and V.V.Chernenko, “Space charge region recombination, non-radiative exciton recombination and the band-narrowing effect in high-efficiency silicon solar cells”, *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics*, vol. 26, no. 2, pp. 127–139, Jun. 2023, doi: 10.15407/spqeo26.02.127.
133. V. Sarritzu, N. Sestu, D. Marongiu, X. Chang, S. Masi, A. Rizzo, S. Colella, F. Quochi, M. Saba, A. Mura and G. Bongiovanni, “Optical determination of Shockley-Read-Hall and interface recombination currents in hybrid perovskites”, *Scientific Reports*, vol. 7, no. 1, Mar. 2017, doi: 10.1038/srep44629.
134. C.-T. Sah, R. Noyce, and W. Shockley, “Carrier generation and recombination in P-N junctions and P-N junction characteristics”, *Proceedings of the IRE*, vol. 45, no. 9, pp. 1228–1243, Sep. 1957, doi: 10.1109/jrproc.1957.278528.
135. E. A. Faulkner and M. J. Buckingham, “Modified theory of the current/voltage relation in silicon p–n junctions”, *Electronics Letters*, vol. 4, no. 17, pp. 359–360, Aug. 1968, doi: 10.1049/el:19680282.
136. J. Pallarès, L. F. Marsal, X. Correig, J. Calderer, and R. Alcubilla, “Space charge recombination in P-N junctions with a discrete and continuous trap distribution”, *Solid-State Electronics*, vol. 41, no. 1, pp. 17–23, Jan. 1997, doi: 10.1016/s0038-1101(96)00140-2.
137. K. McIntosh, P. Altermatt and G. Heiser, “Depletion-region recombination in silicon solar cells: when does $m_{DR} = 2$?”, *European Photovoltaic Solar Energy Conference*, pp. 250-253, 2000.
138. A. Nussbaum, “Generation-recombination characteristic behavior of silicon diodes”, *Physica Status Solidi (A)*, vol. 19, no. 2, pp. 441–450, Oct. 1973, doi: 10.1002/pssa.2210190207.

139. S. C. Choo, "Carrier generation-recombination in the space-charge region of an asymmetrical p-n junction", *Solid-State Electronics*, vol. 11, no. 11, pp. 1069–1077, Nov. 1968, doi: 10.1016/0038-1101(68)90129-9.
140. J. Pallares, L. F. Marsal, X. Correig, J. Calderer, and R. Alcubilla, "Distribution of recombination currents in the space charge region of heterostructure bipolar devices", *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 45, no. 1, pp. 54–61, Jan. 1998, doi: 10.1109/16.658811.
141. A. V. Sachenko, V. P. Kostylyov, I. O. Sokolovskyi, A. V. Bobyl', V. N. Verbitskii, E. I. Terukov and M. Z. Shvarts, "Specific features of current flow in α -Si : H/Si heterojunction solar cells", *Technical Physics Letters*, vol. 43, no. 2, pp. 152–155, Feb. 2017, doi: 10.1134/s1063785017020109.
142. T. C. Chen, C. Kaya, M. B. Ketchen, and T. H. Ning, "Reliability analysis of self-aligned bipolar transistor under forward active current stress", *International Electron Devices Meeting*, pp. 650–653, Jan. 1986, doi: 10.1109/iedm.1986.191275.
143. M. Y. Ghannam and R. P. Mertens, "Surface recombination current with a nonideality factor greater than 2", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 10, no. 6, pp. 242–244, Jun. 1989, doi: 10.1109/55.31734.
144. H. J. Queisser, "Forward characteristics and efficiencies of silicon solar cells", *Solid-State Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 1–10, Jan. 1962, doi: 10.1016/0038-1101(62)90012-6.
145. O. Breitenstein, M. Langenkamp, O. Lang, and A. Schirrmacher, "Shunts due to laser scribing of solar cells evaluated by highly sensitive lock-in thermography", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 65, no. 1–4, pp. 55–62, Jan. 2001, doi: 10.1016/s0927-0248(00)00077-5.
146. S. Steingrube, O. Breitenstein, K. Ramspeck, S. Glunz, A. Schenk, and P. P. Altermatt, "Explanation of commonly observed shunt currents in c-Si solar cells by means of recombination statistics beyond the Shockley-Read-Hall approximation", *Journal of Applied Physics*, vol. 110, no. 1, Jul. 2011, doi: 10.1063/1.3607310.

147. J. Weber, L. Kniffki, L. Gutmann, J. Huyeng, E. Lohmüller, and T. Rößler, “Investigating the impact of edge passivation on shingle solar modules”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 271, p. 112876, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.solmat.2024.112876.
148. K. McIntosh,. “Lumps, Humps and Bumps: Three Detrimental Effects in the Current–Voltage Curve of Silicon Solar Cells”, *Ph.D. dissertation, University of New South Wales, Sydney, Australia*, 2001, doi: 10.13140/RG.2.2.19197.26083.
149. R. Kuhn, P. Fath, and E. Bucher, “Effects of pn-junctions bordering on surfaces investigated by means of 2D-modeling”, *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 116–119, Nov. 2002, doi: 10.1109/pvsc.2000.915768.
150. A. Fell, J. Schon, M. Muller, N. Wohrle, M. C. Schubert, and S. W. Glunz, “Modeling edge recombination in silicon solar cells”, *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 8, no. 2, pp. 428–434, Jan. 2018, doi: 10.1109/jphotov.2017.2787020.
151. K. McIntosh and C.B. Honsberg, “The Influence of Edge Recombination on a Solar Cell's IV Curve”, *University of New South Wales, Sydney, Australia*, 2000.
152. O. Breitenstein, “Understanding the current-voltage characteristics of industrial crystalline silicon solar cells by considering inhomogeneous current distributions”, *Opto-Electronics Review*, vol. 21, no. 3, Jan. 2013, doi: 10.2478/s11772-013-0095-5.
153. S. Steingrube, O. Breitenstein, K. Ramspeck, S. Glunz, A. Schenk, and P. P. Altermatt, “Explanation of commonly observed shunt currents in c-Si solar cells by means of recombination statistics beyond the Shockley-Read-Hall approximation,” *Journal of Applied Physics*, vol. 110, no. 1, Jul. 2011, doi: 10.1063/1.3607310.
154. S. Steingrube, “Recombination Models for Defects in Silicon Solar Cells”, *D. dissertation, Leibniz University of Hannover*, 2011.
155. A. M. Humada, M. Hojabri, S. Mekhilef, and H. M. Hamada, “Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review”,

- Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 494–509, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.051.
156. R. Venkateswari and N. Rajasekar, “Review on parameter estimation techniques of solar photovoltaic systems”, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 11, Sep. 2021, doi: 10.1002/2050-7038.13113.
 157. A. M. Shaheen, R. A. El-Seheimy, G. Xiong, E. Elattar, and A. R. Ginidi, “Parameter identification of solar photovoltaic cell and module models via supply demand optimizer”, *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 13, no. 4, p. 101705, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.asej.2022.101705.
 158. A. Sharma, A. Sharma, M. Averbukh, V. Jatly, S. Rajput, B. Azzopardi and W.H. Lim, “Performance investigation of state-of-the-art metaheuristic techniques for parameter extraction of solar cells/module”, *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, Jul. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-37824-4.
 159. M. Wolf and H. Rauschenbach, “Series resistance effects on solar cell measurements”, *Advanced Energy Conversion*, vol. 3, no. 2, pp. 455–479, Apr. 1963, doi: 10.1016/0365-1789(63)90063-8.
 160. G.M.M.W. Bissels, J.J. Schermer, M.A.H. Asselbergs, E.J. Haverkamp, P. Mulder, G.J. Bauhuis and E. Vlieg., “Theoretical review of series resistance determination methods for solar cells”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 130, pp. 605–614, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.solmat.2014.08.003.
 161. D. Pysch, A. Mette, and S. W. Glunz, “A review and comparison of different methods to determine the series resistance of solar cells”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 91, no. 18, pp. 1698–1706, Jul. 2007, doi: 10.1016/j.solmat.2007.05.026.
 162. IEC 60891:2021 Photovoltaic devices - *Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics* [Online]. Available: webstore.iec.ch/publication/61766

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. О.Ю. Гаєвський, В.Ю. Іванчук, І.О. Корнієнко та В.В. Бодняк, «Алгоритм і програмне забезпечення для Arduino-системи тестування фотоелектричних модулів», *Відновлювана енергетика*, вип. 1 (64), с. 42-49, Бер 2021, doi: 10.36296/1819-8058.2021.1(64).42-49.
2. О.Ю. Гаєвський та В.Ю. Іванчук, «Автономна система вимірювання на основі мікрокомп'ютера для тестування фотоелектричних модулів», *Відновлювана енергетика*, вип. 3 (70), с. 54-61, Вер. 2022, doi: 10.36296/1819-8058.2022.3(70).54-61
3. О.Ю. Гаєвський, Г.М. Гаєвська та В.Ю. Іванчук, «Резервна фотоелектрична станція в умовах періодичних відключень споживачів від електромережі», *Відновлювана енергетика*, вип. 1 (72), с. 27-36, Квіт 2023, doi: 10.36296/1819-8058.2023.1(72).27-36.
4. О.Ю. Гаєвський, В.Ю. Іванчук та Г.М. Гаєвська, «Аналіз взаємозалежностей параметрів фотоелектричних модулів та їх змінення при різних рівнях сонячної радіації», *Відновлювана енергетика*, вип. 3 (74), с. 59-65, Жов 2023, doi: 10.36296/1819-8058.2023.3(74).59-65.
5. О.Ю. Гаєвський та В.Ю. Іванчук, «Моделювання ВАХ фотоелектричного модуля зі змінними фактором ідеальності та зворотним струмом насичення», *Відновлювана енергетика*, вип. 3 (78), с. 54-61, Вер 2024, doi: 10.36296/1819-8058.2024.3(78).54-61.
6. A. Gaevskii and V. Ivanchuk, "Stand-alone system on Raspberry platform for measuring the parameters of photovoltaic modules in real conditions", *International scientific and technical journal "Modern problems of electric power engineering and automation"*, pp. 279-281, Jan 2024, available: jour.fea.kpi.ua/article/view/302496.

7. В.Ю. Іванчук та О.Ю. Гаєвський. «Вимірювання характеристик двосторонніх фотоелектричних модулів в різних режимах роботи», *Міжнародний науково-технічний журнал «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики»*, с. 294-296, Січ 2024, доступно: jour.fea.kpi.ua/article/view/302501.

ДОДАТОК Б. ЗОВНІШНІЙ ВИГЛЯД СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ

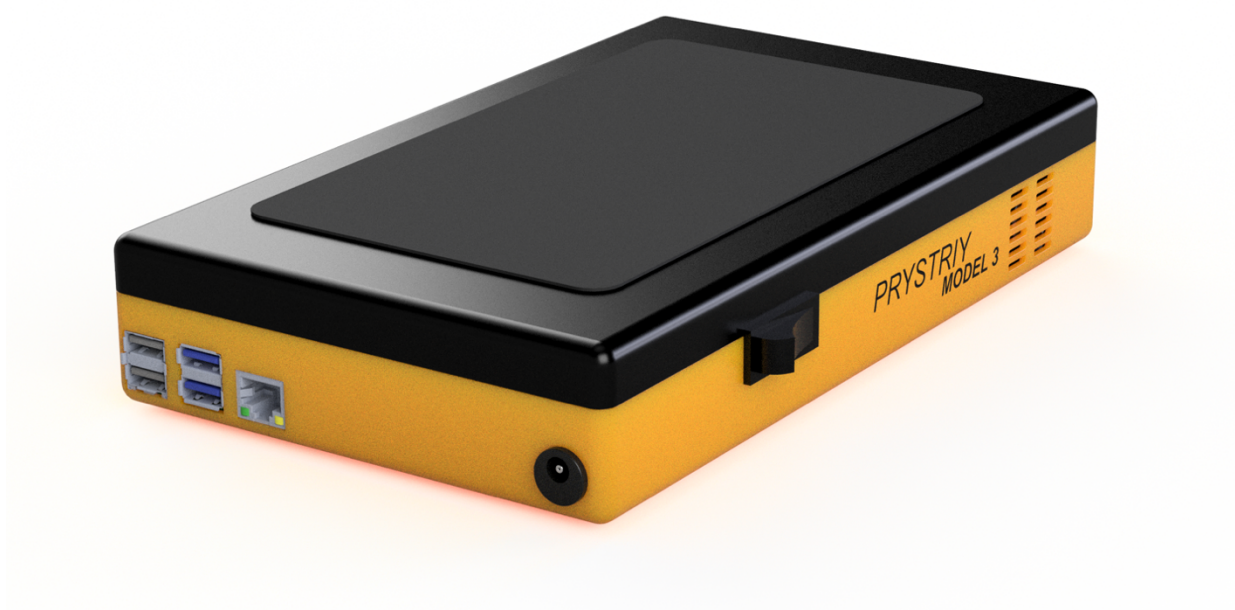
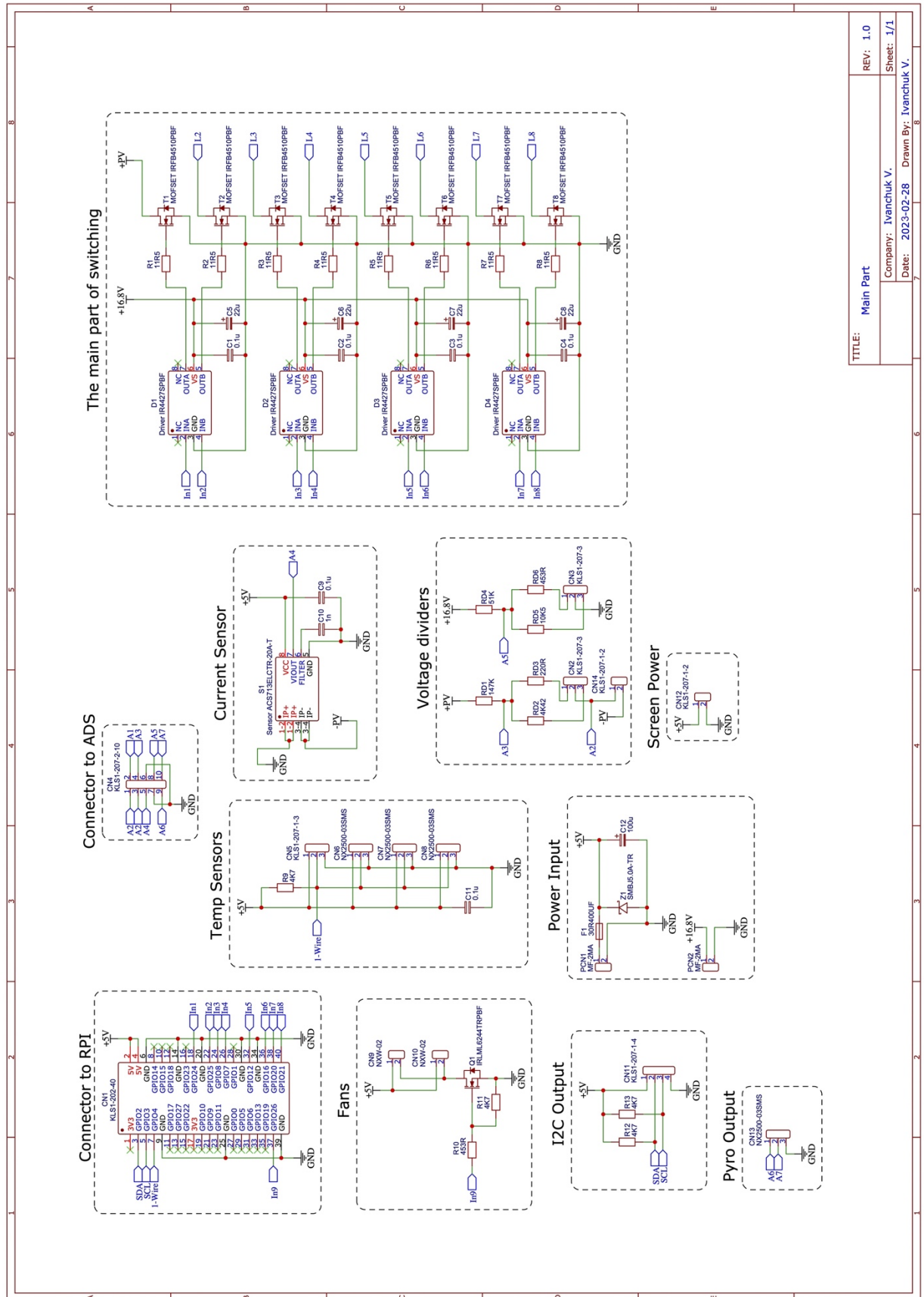


Рисунок Б.1 Зовнішній вигляд системи вимірювання (рендер)



Рисунок Б.2 Система вимірювання під час використання (фото)

ДОДАТОК В. ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ



TITLE: Main Part	REV: 1.0
Company: Ivanchuk V.	Sheet: 1/1
Date: 2023-02-28	Drawn By: Ivanchuk V.

Рисунок В.1 Електрична схема системи вимірювання

ДОДАТОК Г. ФРАГМЕНТ ПРОГРАМНОГО КОДУ МОДУЛЯ

PRYSTRIY_UI.PY АЛГОРИТМУ УПРАВЛІННЯ

```

import tkinter as tk
import tkinter.ttk as ttk
import tkinter.font as tkFont
from tkinter import messagebox
import tkinter.scrolledtext as st

import os

import Prystriy_data as PD
import Prystriy_functions as functions

import time
from datetime import datetime
import threading

#-----
#----- Global Settings -----
#-----
application = None #global application variable
resolutionX = 800
resolutionY = 480
screenresolution = ("%d" % resolutionX)+("x%d"%resolutionY)
isFullscreen = True

#-----STYLE VARIABLES-----
rightFrameWidth = 200
leftFrameWidth = 200
centerFrameWidth = 800 - rightFrameWidth - leftFrameWidth
globalPadding = 0

backgroundColour = '#e3e3e3'
activeBackgroundColour = '#D4D4D4'

Style_test = None
#-----
#-----FIELD VARIABLES-----
#-----
cpu_load_Value = None
battery_voltage = None
irradiance_value = None
voltage_value = None
temp1_value = None
temp2_value = None
estimated_time_Value = None
estimated_R_Value = None
mode_values = None
load_values = None
entry_Np_value = None
save_plot = None
fan_status = None
parameters = None

transistor_states = None
#-----
#-----DEFINING-----
#-----
    global cpu_load_Value, battery_voltage, irradiance_value,
    voltage_value, estimated_time_Value, estimated_R_Value, mode_values,

```

```

load_values, entry_Np_value, save_plot, fan_status, parameters, temp1_value,
temp2_value
    cpu_load_Value = tk.StringVar()
    battery_voltage = tk.StringVar()
    irradiance_value = tk.StringVar()
    voltage_value = tk.StringVar()
    temp1_value = tk.StringVar()
    temp2_value = tk.StringVar()
    estimated_time_Value = tk.StringVar()
    estimated_R_Value = tk.StringVar()
    entry_Np_value = tk.IntVar()
    mode_values = tk.StringVar()
    load_values = tk.StringVar()
    save_plot = tk.IntVar()
    fan_status = tk.IntVar()
    parameters = tk.IntVar()

    global transistor_states
    transistor_states =
[tk.IntVar(),tk.IntVar(),tk.IntVar(),tk.IntVar(),tk.IntVar(),tk.IntVar(),tk.In
tVar(),tk.IntVar()]
    for i in range(0, PD.prystriy_internal_data.numberOfTransistors):
        transistor_states[i].set(0)

    save_plot.set(int(PD.prystriy_internal_data.save_plot))
    parameters.set(int(PD.prystriy_internal_data.parameters))
#-----
#-----FUNCTIONS-----
#-----
#functions from Prystriy Functions
def openPressed(self):

    file = tk.filedialog.askopenfile(title='Please select one text file
with data.',filetypes=[('Text File', ['.txt'])])

    if not file:
        self.writeToConsole("No files selected")
        return None

    md = functions.openFile(file)
    md = functions.calculateData(md)
    functions.drawPlot(md)
    functions.fillTable(md)

def savePressed(self):
    functions.savePressed()

def measurePressed(self):
    # self.updateSystemData()
    # time.sleep(0.05)
    functions.measurePressed()

def exitPressed(self):
    functions.exitFcn()

def on_closing(self):
    if messagebox.askokcancel("Quit", "Do you want to quit?"):
        functions.exitFcn()
        self.destroy()

def setNp(self, *args):
    try:

```

```

        PD.prystriy_internal_data.numberOfPoints = entry_Np_value.get()
    except ValueError:
        self.writeToConsole("Error during assignment number of points")
        return

# UI Functions
def writeToConsole(self, message):
    now = datetime.now()
    formatted_date = now.strftime("%H:%M:%S")
    if message != None:
        self.console.insert(1.0, f'[{formatted_date}]: {message};\n')

def change_Np_value(self, isIncreased):
    if isIncreased:
        if entry_Np_value.get() < PD.prystriy_internal_data.maximumPoints:
            entry_Np_value.set(entry_Np_value.get()+1)
    else:
        if entry_Np_value.get() > 0:
            entry_Np_value.set(entry_Np_value.get()-1)
    PD.prystriy_internal_data.numberOfPoints = entry_Np_value.get()
    estimated_time_Value.set(functions.calculateEstimation() + " s")

def debug_transistor(self, transistor, state):
    global transistor_states
    functions.changeTransistor(transistor, state)
    PD.prystriy_internal_data.current_code[transistor] = state
    estimated_R_Value.set("%.3f" %
functions.calculateResistance(PD.prystriy_internal_data.current_code) + "
0hm")

def open_circuit_button(self):
    global transistor_states
    for i in range(0, PD.prystriy_internal_data.numberOfTransistors):
        PD.prystriy_internal_data.current_code[i] = 0
        transistor_states[i].set(0)
    functions.openCircuit()
    estimated_R_Value.set("%.3f" %
functions.calculateResistance(PD.prystriy_internal_data.current_code) + "
0hm")

def short_circuit_button(self):
    global transistor_states
    for i in range(0, PD.prystriy_internal_data.numberOfTransistors):
        PD.prystriy_internal_data.current_code[i] = 1
        transistor_states[i].set(1)
    functions.shortCircuit()
    estimated_R_Value.set("%.3f" %
functions.calculateResistance(PD.prystriy_internal_data.current_code) + "
0hm")

def mode_changed(self, *args):
    global mode_values
    try:
        for x in range(0, len(self.modes)):
            if self.modes[x] == mode_values.get():
                PD.prystriy_internal_data.measurement_mode = x
                estimated_time_Value.set(functions.calculateEstimation() +
" s")
                return
    except ValueError:
        self.writeToConsole("Error during assignment of mode")
        return

```

```

def load_changed(self, *args):
    global load_values
    try:
        for x in range(0, len(self.loads)):
            if self.loads[x] == load_values.get():
                PD.prystriy_internal_data.measurement_load = x
                #estimated_time_Value.set(functions.calculateEstimation()
+ " s")
                return
    except ValueError:
        self.writeToConsole("Error during assigment of load type")
        return

def updateSystemData(self):
    global cpu_load_Value, battery_voltage, irradiance_value,
voltage_value

    cpu_load_Value.set("CPU Temp: " + ("%.1f" %
functions.cpu_temperature()) + " °C")
    battery = functions.battery_voltage()
    battery = battery - 12
    percentage = (battery/4.8)*100
    battery_voltage.set("Battery: " + ("%.1f" % percentage) + " %")

    Ir = functions.measureIrradiance()
    V = functions.measureVoltage()
    irradiance_value.set("Irradiance: " + ("%.3f" % Ir) + " W/m2")
    voltage_value.set("PV Voltage: " + ("%.3f" % V) + " V")
    self.updateTemp()

def updateTemp(self):
    temp1_value.set("Temp 1: " + ("%.2f" % functions.read_temp_old(number
= 1)) + " °C")
    temp2_value.set("Temp 2: " + ("%.2f" % functions.read_temp_old(number
= 2)) + " °C")

#-----
#-----WINDOWS-----
#-----

def initUI():
    global application
    application = mainwindow()
    #Create window and set reference resolution
    application.title("Prystriy Pi OS %s"%PD.prystriy_internal_data.OSversion)
    application.fullScreenState = isFullscreen
    application.wm_attributes("-fullscreen", True)
    application.geometry(screenresolution)
    application.resizable(width=False, height=False)
    application.protocol("WM_DELETE_WINDOW", application.on_closing)
    # application.config(cursor="none")
    application.mainloop()

def createUI():
    try:
        # Run the application
        initUI()
    except Exception as e:
        functions.safequit(e)

```

ДОДАТОК Д. ПРОГРАМНИЙ КОД МОДУЛЯ
PRYSTRIY_FUNCTIONS.PY АЛГОРИТМУ УПРАВЛІННЯ

```
import Prystriy_UI as UI
import Prystriy_data as PD
import RPi.GPIO as GPIO
import ADS1256

import os
import glob
from concurrent.futures import ThreadPoolExecutor
import threading
import math
import numpy as np
from pathlib import Path
from tkinter import messagebox

import time
from timeit import default_timer as timer
from datetime import datetime
from datetime import date

#import plot libraries
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
from utils import Utils
import psutil
from scipy.optimize import curve_fit
from scipy.optimize import fsolve

# global variables
ADC = []
figure = plt.Figure(figsize=(40,10), dpi=300)
lock = threading.Lock()

pin_list = PD.prystriy_internal_data.pin_list      #list of pins, used for
output and control of small circuit
fan_pin = PD.prystriy_internal_data.fan_pin
n_pins = len(pin_list)                            #number of pins in list

# Ініціалізація виводів GPIO
os.system('modprobe w1-gpio')
os.system('modprobe w1-therm')

temp_sensor = '/sys/bus/w1/devices/28-01206a14b311/w1_slave'
temp_sensor1 = '/sys/bus/w1/devices/28-01206a14b311/w1_slave'
temp_sensor2 = '/sys/bus/w1/devices/28-03191c1eeab2/w1_slave'

def startupFcn():
    connectingADC()      #use initial command to connect ADC and set initial
configuration.
    calculateAllCombinations() #generate all resistance and combinations
    config()

def exitFcn(e = None):
    if e == None:
        print ("\n\nProgram end")
    else:
        print ("\n\nProgram end with error: " + str(e))
    safequit("Exit function occured")
```



```

def config():
    global pin_list, fan_pin
    GPIO.setmode(GPIO.BCM)
    GPIO.setup(pin_list, GPIO.OUT, initial=GPIO.LOW) #set to used pins OUT
mode and low value
    GPIO.setup(fan_pin, GPIO.OUT, initial=GPIO.LOW) #set to used pins OUT mode
and low value

def connectingADC():
    global ADC
    try:
        ADC = ADS1256.ADS1256()
        ADC.ADS1256_init()
    except Exception as e:
        exitFcn(e)

def measureCurrent():
    try:
        current_raw =
ADC.ADS1256_GetChannalValue(PD.prystriy_internal_data.ADC_current_channel)
        current_raw = current_raw * 5.0/0x7ffffff - 0.49
        current = current_raw/0.185
        return current
    except Exception as e:
        exitFcn(e)

def measureVoltage():
    try:
        voltage_raw =
ADC.ADS1256_GetChannalValue(PD.prystriy_internal_data.ADC_voltage_channel)
        voltage_raw = voltage_raw * 5.0/0x7ffffff
        voltage = voltage_raw * 17.1526586621
        return voltage
    except Exception as e:
        exitFcn(e)

def measureIrradiance():
    try:
        irradiance_raw =
ADC.ADS1256_GetChannalValue(PD.prystriy_internal_data.ADC_irradiance_channel)
        irradiance_raw = irradiance_raw * 5.0/0x7ffffff
        irradiance = irradiance_raw / 0.00008138 # 81.38  $\mu$ V/W/m2
        return irradiance
    except Exception as e:
        exitFcn(e)

def openFile(path = None):
    if path == None:
        UI.application.writeToConsole("No path selected")
    else:
        file_Path = path

    data = []
    try:
        data = np.loadtxt(file_Path, delimiter="\t", dtype = 'float')
    except Exception as e:
        UI.application.writeToConsole("\r\nError with reading file, error: " +
str(e))

    md = PD.measurement_data()
    md.current = data[:,1]

```

```

md.voltage = data[:,0]
#md.irradiance = data[:,3]
try:
    md.power = data[:,2]
except:
    md.power = [0]*len(md.current)
    for i in range(0,len(md.current)):
        md.power[i] = md.current[i] * md.voltage[i]
md = calculateData(md)

mpi = md.power.index(md.Pm)
md.UPm = md.voltage[mpi]
md.IPm = md.current[mpi]

if PD.prystriy_internal_data.parameters:
    try:
        md = calculateParameters(md)
        UI.application.writeToConsole("Parameters calculated")
    except Exception as e:
        UI.application.writeToConsole("Error during determining
parameters, skipping, error: " + str(e))
    drawPlot(md)
    updateUI(md)
    fillTable(md)
    PD.prystriy_internal_data.current_md = md
    UI.application.writeToConsole("Opened file: " +
str(os.path.basename(path.name)))
    return md

def saveFile(md):
    data = [ [0]*5 for i in range(len(md.current))]
    for x in range(0, len(md.current)):
        data[x][1] = md.current[x]
        data[x][0] = md.voltage[x]
        data[x][2] = md.power[x]
        try:
            data[x][3] = md.irradiance[x]
        except:
            data[x][3] = 0
        try:
            data[x][4] = md.temperature[x]
        except:
            data[x][4] = 0

    now = datetime.now()
    today = date.today()
    formatted_date = today.strftime("%Y-%m-%d")
    formatted_time = now.strftime("%H-%M-%S")
    mean_irradiance = np.round_(np.mean(md.irradiance))

    path_default = Path("measurements/")
    file_name = ("%s" % formatted_date) + ("_%s" % formatted_time) + (" %d" %
mean_irradiance) + " Wm2.txt"
    file_path = path_default / file_name
    fmt = ['%1.3f', '%1.3f', '%1.2f', '%1.2f', '%1.2f']
    np.savetxt(file_path, data, fmt=fmt, delimiter = '\t')
    UI.application.writeToConsole("Saved file: "+ file_name)

    if PD.prystriy_internal_data.save_plot:
        savePlot(md, path_default, ("%s" % formatted_date) + ("_%s" %
formatted_time) + (" %d" % mean_irradiance) + " Wm2.png")
        UI.application.writeToConsole("Plot saved")

```

```

else:
    UI.application.writeToConsole("Plot is not saved")

def savePressed(md = None):
    if md == None:
        UI.application.writeToConsole("No md passed")
        if PD.prystriy_internal_data != None:
            saveFile(PD.prystriy_internal_data.current_md)
    else:
        saveFile(md)

def measurePressed():
    if PD.prystriy_internal_data.measurement_load == 0:
        measure_resistive()
    elif PD.prystriy_internal_data.measurement_load == 1:
        measure_resistive()
    elif PD.prystriy_internal_data.measurement_load == 2:
        # if messagebox.askokcancel("WARNING!", "Have you discharged
capacitor?"):
        # time.sleep(5)
        measure_capacitive()
    else:
        UI.application.writeToConsole("Wrong load selected!")

def measure_resistive():
    try:
        md = PD.measurement_data() #create a measurement object
        measurePVdata()
        combinations = getCombinations()

        md.voltage = [0]*len(combinations)
        md.current = [0]*len(combinations)
        md.power = [0]*len(combinations)
        md.irradiance = [0]*len(combinations)

        start = timer() #start clock
        percentage = 100/(len(combinations)-1)
        for x in range(0, len(combinations)):
            setTransistor(combinations[x])
            md.voltage[x] = measureVoltage()
            md.current[x] = measureCurrent()
            md.irradiance[x] = measureIrradiance()
            provisional = timer()
            UI.application.pbar['value'] = x * percentage
            UI.application.update_idletasks()
            if provisional - start > PD.prystriy_internal_data.safeTime:
                safequit("Program works too long and closed for security
reason")
            time.sleep(PD.prystriy_internal_data.delay)
        end = timer() #stop clock
        openCircuit()
        md.totalTime = end - start #calculate total time for entire
measurement process
        md = calculateData(md)

    except Exception as e:
        safequit("Program end due to error during measurement. Error: " +
str(e))

    if PD.prystriy_internal_data.parameters:
        try:
            md = calculateParameters(md)

```

```

        except Exception as e:
            UI.application.writeToConsole("Error during determining
parameters, skipping, error: " + str(e))

    try:
        avarage_time = 0
        if PD.prystriy_internal_data.measurement_mode == 3:
            avarage_time =
md.totalTime/PD.prystriy_internal_data.maximumPoints
        else:
            avarage_time =
md.totalTime/PD.prystriy_internal_data.numberOfPoints

        UI.application.writeToConsole("Measured using resistive method,
\nTotal time of measurement: " + ("%2f" % md.totalTime) + ",\nAvarage delay
between data: " + ("%4f" % (avarage_time)) + "\nNumber of points: " +
str(PD.prystriy_internal_data.numberOfPoints) + ",\nAvarage irradiance: " +
("%2f" % (np.mean(md.irradiance))))
        updateUI(md)
        drawPlot(md)
        fillTable(md)
    except Exception as e:
        safequit("Program end due to error during updating UI. Error: " +
str(e))

    try:
        saveFile(md)
    except Exception as e:
        safequit("Program end due to error during saving. Error: " + str(e))

    PD.prystriy_internal_data.current_md = md

def discharge_capacitive():
    changeTransistor(1,0)
    changeTransistor(2,1)
    time.sleep(90)
    changeTransistor(2,0)

def measure_capacitive():
    for x in range(0, num):
        md = PD.measurement_data() #create a measurement object
        md.voltage = []
        md.current = []
        md.irradiance = []
        changeTransistor(0,1)
        # time.sleep(0.001)
        md.voltage.append(measureVoltage())
        md.current.append(measureCurrent())
        md.irradiance.append(measureIrradiance())
        changeTransistor(0,0)
        time.sleep(0.001)
        changeTransistor(1,1)
        # time.sleep(0.001)
        start = timer() #start clock
        while md.current[-1] > PD.prystriy_internal_data.current_threshold:
            md.voltage.append(measureVoltage())
            # time.sleep(0.00025)
            md.current.append(measureCurrent())
            md.irradiance.append(measureIrradiance())
            # time.sleep(0.00092) # 0.00183 час на одну ітерацію
            time.sleep(0.00183) # 0.00183 час на одну ітерацію
            provisional = timer()

```

```

        if provisional - start > PD.prystriy_internal_data.safeTime:
            break
    end = timer()    #stop clock
    changeTransistor(1,0)
    time.sleep(0.001)
    md.voltage.append(measureVoltage())
    md.current.append(measureCurrent())
    md.irradiance.append(measureIrradiance())
    md.totalTime = end - start #calculate total time for entire
measurement process
    PD.prystriy_internal_data.totalTime = md.totalTime
    md.power = [0]*len(md.current)
    md = calculateData(md)
    UI.application.writeToConsole("Total time: " + str(md.totalTime))
    UI.application.writeToConsole("Num of points: " +
str(len(md.current)))
    UI.application.writeToConsole("Time for point: " +
str(md.totalTime/len(md.current)))

    if PD.prystriy_internal_data.parameters:
        try:
            md = calculateParameters(md)
        except Exception as e:
            UI.application.writeToConsole("Error during determining
parameters, skipping, error: " + str(e))

        try:
            UI.application.writeToConsole("Measured using capacitive method,
\nTotal time of measurement: " + ("%2f" % md.totalTime) + ",\nAvarage time
for one data: " + ("%4f" % (md.totalTime/len(md.current)))) + "\nNumber of
points: " + str(len(md.current)) + ",\nAvarage irradiance: " + ("%2f" %
(np.mean(md.irradiance))))
            updateUI(md)
            drawPlot(md)
            fillTable(md)
        except Exception as e:
            safequit("Program end due to D error during updating UI. Error: "
+ str(e))

        try:
            md.temperature = measureTemperature()
        except Exception as e:
            UI.application.writeToConsole("Error during determining
temperature, skipping, error: " + str(e))

        try:
            saveFile(md)
        except Exception as e:
            safequit("Program end due to error during saving. Error: " +
str(e))

    PD.prystriy_internal_data.current_md = md
    discharge_capacitive()

def safequit(message):
    openCircuit()
    GPIO.cleanup()
    print("\r\n%s"%message)
    exit()

```

```

#-----
#----- MEASUREMTN FCN -----

```

```

#-----
def calculateData(md):
    if type(md.power) is list:
        md.power = md.power
    else:
        md.power = [0]*len(md.current)
    for x in range(0, len(md.current)):
        md.power[x] = md.voltage[x] * md.current[x]
    md.Um = max(md.voltage)
    md.Im = max(md.current)
    md.Pm = max(md.power)
    mpi = md.power.index(md.Pm)
    md.UPm = md.voltage[mpi]
    md.IPm = md.current[mpi]
    return md

def measurePVdata():
    openCircuit()
    PD.prystriy_internal_data.U_pv = measureVoltage()
    shortCircuit()
    PD.prystriy_internal_data.I_pv = measureCurrent()

def openCircuit():
    for x in range(0, n_pins):
        GPIO.output(pin_list[x], 0)

def shortCircuit():
    for x in range(0, n_pins):
        GPIO.output(pin_list[x], 1)

def setTransistor(code):
    for x in range(0, n_pins):
        GPIO.output(pin_list[x], code[x])

def changeTransistor(number, state):
    if 0 <= number <= PD.prystriy_internal_data.numberOfTransistors:
        GPIO.output(pin_list[number], state)
        UI.application.writeToConsole("Transistor #" + str(number) + " change
to state: " +str(state))

def fan(state):
    GPIO.output(fan_pin, state)
    PD.prystriy_internal_data.fan_status = state
    UI.application.writeToConsole("Fan Status: " + str(state))

#-----
#-----UI ADDITIONAL-----
#-----

def updateUI(md):
    if md.current_approx != None:
        UI.application.label_Um_result.config(text = ("%3f" % md.Um_approx) +
" V")
        UI.application.label_Im_result.config(text = ("%3f" % md.Im_approx) +
" A")
        UI.application.label_Pm_result.config(text = ("%3f" % md.Pm_approx) +
" W")
    else:
        UI.application.label_Um_result.config(text = ("%3f" % md.Um) + " V")
        UI.application.label_Im_result.config(text = ("%3f" % md.Im) + " A")

```

```

        UI.application.label_Pm_result.config(text = ("%3f" % md.Pm) + " W")

    if md.A != None:
        UI.application.label_A_result.config(text = ("%3f" % md.A))
    if md.Rs != None:
        UI.application.label_Rs_result.config(text = ("%3f" % md.Rs) + "
0hm")
    if md.Rp != None:
        UI.application.label_Rp_result.config(text = ("%3f" % md.Rp) + "
0hm")

def fillTable(md):
    rounded_voltage = [0]*len(md.voltage)
    rounded_current = [0]*len(md.current)
    rounded_power = [0]*len(md.power)

    for x in range(0, len(md.current)):
        rounded_voltage[x] = round(md.voltage[x], 5)
        rounded_current[x] = round(md.current[x], 5)
        rounded_power[x] = round(md.power[x], 5)

    UI.application.U_list.set(rounded_voltage)
    UI.application.I_list.set(rounded_current)
    UI.application.P_list.set(rounded_power)

def drawPlot(md):
    global figure
    figure, ax = plt.subplots(constrained_layout=True)
    coef = (md.Pm/md.Im) * 1.4
    try:
        # UI.application.writeToConsole("Drawing additional code")
        if type(md.voltage_approx) is list:
            U_Line = plt.Line2D((0, md.UPm_approx), (md.IPm_approx,
md.IPm_approx), color = '#17becf', lw = 1, linestyle=(0,(1,5)))
            I_Line = plt.Line2D((md.UPm_approx, md.UPm_approx),
(md.IPm_approx, 0), color = '#17becf', lw = 1, linestyle=(0,(1,5)))
            ax.add_line(U_Line)
            ax.add_line(I_Line)
            ax.plot(md.voltage, md.current, linestyle='None', marker='.',
color='#1f77b4', label="Data")
            ax.plot(md.voltage_approx, md.current_approx, linestyle='-',
color='#ff7f0e', label="Approx")
            power_decreased = [0]*len(md.power_approx)
            for i in range(0, len(md.power_approx)):
                power_decreased[i] = md.power_approx[i]/coef
            ax.plot(md.voltage_approx, power_decreased, color='#2ca02c',
linestyle='--', label="Power")
        else:
            U_Line = plt.Line2D((0, md.UPm), (md.IPm, md.IPm), color =
'#17becf', lw = 1, linestyle=(0,(1,5)))
            I_Line = plt.Line2D((md.UPm, md.UPm), (md.IPm, 0), color =
'#17becf', lw = 1, linestyle=(0,(1,5)))
            ax.add_line(U_Line)
            ax.add_line(I_Line)
            ax.plot(md.voltage, md.current, marker='.', color='#1f77b4',
label="Data")
            power_decreased = [0]*len(md.power)
            for i in range(0, len(md.power)):
                power_decreased[i] = md.power[i]/coef
            ax.plot(md.voltage, power_decreased, color='#2ca02c',
linestyle='--', label="Power")

```

```

except Exception as e:
    UI.application.writeToConsole("Error during drawing of additional
plots: " + str(e))

def I2P(x):
    return np.round(x * coef,2)
def P2I(x):
    return np.round(x / coef,2)

ax.set_ylabel('Current, I', fontsize='small', fontweight='bold')
ax.set_xlabel('Voltage, V', fontsize='small', fontweight='bold')
ax.set_title('IV-curve', fontweight='bold')
secax = ax.secondary_yaxis('right', functions=(I2P,P2I))
secax.set_ylabel('Power, W', fontsize='small', fontweight='bold')
ax.grid()
ax.legend()
ax.set(xlim=(0, max(md.voltage) * 1.15), ylim=(0, max(md.current) * 1.15))

chart_type = FigureCanvasTkAgg(figure, UI.application.frmGraph)
chart_type.get_tk_widget().grid(row=0, column=0, sticky = "NEWS")

def savePlot(md, path, name):
    figure, ax = plt.subplots(constrained_layout=True)
    coef = (md.Pm/md.Im) * 1.4
    try:
        # UI.application.writeToConsole("Drawing additional code")
        if type(md.voltage_approx) is list:
            ax.plot(md.voltage, md.current, linestyle='None', marker='.',
color='#1f77b4', label="Data")
            ax.plot(md.voltage_approx, md.current_approx, linestyle='--',
color='#ff7f0e', label="Approx")
            power_decreased = [0]*len(md.power_approx)
            for i in range(0, len(md.power_approx)):
                power_decreased[i] = md.power_approx[i]/coef
            ax.plot(md.voltage_approx, power_decreased, color='#2ca02c',
linestyle='--', label="Power")
        else:
            ax.plot(md.voltage, md.current, marker='.', color='#1f77b4',
label="Data")
            power_decreased = [0]*len(md.power)
            for i in range(0, len(md.power)):
                power_decreased[i] = md.power[i]/coef
            ax.plot(md.voltage, power_decreased, color='#2ca02c',
linestyle='--', label="Power")
    except Exception as e:
        UI.application.writeToConsole("Error during drawing of additional
plots: " + str(e))

def I2P(x):
    return np.round(x * coef,2)
def P2I(x):
    return np.round(x / coef,2)

ax.set_ylabel('Current, I', fontsize='small', fontweight='bold')
ax.set_xlabel('Voltage, V', fontsize='small', fontweight='bold')
ax.set_title('IV-curve ' + str(name), fontweight='bold')
secax = ax.secondary_yaxis('right', functions=(I2P,P2I))
secax.set_ylabel('Power, W', fontsize='small', fontweight='bold')
ax.grid()
ax.legend()
ax.set(xlim=(0, max(md.voltage) * 1.15), ylim=(0, max(md.current) * 1.15))
path = path / name

```



```

figure.savefig(path, dpi=300)
UI.application.writeToConsole("Saved plot: " + name)

#-----
#-----SYSTEM CONTROL-----
#-----
def calculateEstimation():
    estimation = float(PD.prystriy_internal_data.numberOfPoints) *
PD.prystriy_internal_data.avarageTime
    result = ("%.3f" % estimation)
    return result

def cpu_temperature():
    return psutil.sensors_temperatures()['cpu_thermal'][0].current

def battery_voltage():
    try:
        battery_raw =
ADC.ADS1256_GetChannalValue(PD.prystriy_internal_data.ADC_battery_channel)
        battery_raw = battery_raw * 5.0/0xfffff
        battery = battery_raw * 3.62259615
        return battery
    except :
        exitFcn()

def temp_raw(temp_s):
    f = open(temp_s, 'r')
    lines = f.readlines()
    f.close()
    return lines

def read_temp_old(number = 0):
    if number == 1:
        temp_s = temp_sensor1
    elif number == 2:
        temp_s = temp_sensor2
    else:
        temp_s = temp_sensor
    lines = temp_raw(temp_s)
    while lines[0].strip()[-3:] != 'YES':
        time.sleep(0.2)
        lines = temp_raw(temp_s)
    # device file.
    temp_output = lines[1].find('t=')
    if temp_output != -1:
        temp_string = lines[1][temp_output + 2:]
        temp_c = float(temp_string) / 1000.0
        temp_f = temp_c * 9.0 / 5.0 + 32.0
    else:
        temp_c = -273.3
    return temp_c

def read_rom(device_folder):
    name_file = device_folder + '/name'
    with open(name_file, 'r') as f:
        return f.readline().strip()

def read_temp_raw(device_file):
    with open(device_file, 'r') as f:
        lines = f.readlines()
    return lines

```

```

def read_temp(device_folder):
    device_file = device_folder + '/w1_slave'
    lines = read_temp_raw(device_file)
    # Analyze if the last 3 characters are 'YES'.
    while lines[0].strip()[-3:] != 'YES':
        time.sleep(0.01) # Reduce delay for faster response
        lines = read_temp_raw(device_file)
    # Find the index of 't=' in a string.
    equals_pos = lines[1].find('t=')
    if equals_pos != -1:
        # Read the temperature.
        temp_string = lines[1][equals_pos + 2:]
        temp_c = float(temp_string) / 1000.0
        return temp_c

def get_device_folder_by_rom(rom):
    base_dir = '/sys/bus/w1/devices/'
    # Get all the filenames that begin with 28 in the path base_dir.
    device_folders = glob.glob(base_dir + '28*')
    for folder in device_folders:
        if read_rom(folder) == rom:
            return folder
    return None

def read_sensor(rom, offset):
    device_folder = get_device_folder_by_rom(rom)
    if device_folder:
        temp_c = read_temp(device_folder)
        calibrated_temp = temp_c + offset
        return calibrated_temp
    return None

def measureTemperature():
    # Dictionary of sensor numbers and their corresponding ROM codes and
    # calibration offsets
    sensor_roms = {
        1: {'rom': '28-0000000ef5b7', 'offset': +0}, # 2 cell
        2: {'rom': '28-000000125c8b', 'offset': +0.17}, # 4 cell
        3: {'rom': '28-0000000f5e78', 'offset': +0.17}, # 6 cell
        4: {'rom': '28-00000c95a16b', 'offset': -0.1}, # 27 cell
        5: {'rom': '28-00000fb0969c', 'offset': -0.1}, # 31 cell
        6: {'rom': '28-00000012ab6f', 'offset': -0.1}, # 35 cell
        7: {'rom': '28-00000c93961e', 'offset': +0}, # 56 cell
        8: {'rom': '28-00000c95cb8d', 'offset': +0.04}, # 58 cell
        9: {'rom': '28-00000fb16f6d', 'offset': -0.06} # 60 cell
    }

    results = []
    with ThreadPoolExecutor() as executor:
        futures = [executor.submit(read_sensor, details['rom'],
        details['offset']) for num, details in sensor_roms.items()]
        for future in futures:
            if future.result() is not None:
                results.append(round(future.result(), 2))
            else:
                results.append(0)
    results.append(round((sum(results) / len(results)), 2))
    results.append(PD.prystriy_internal_data.totalTime * 10)
    return results

```

ДОДАТОК Е. ПРОГРАМНИЙ КОД ФУНКЦІЇ ПІДГОТОВКИ ТА ОЧИСТКИ ДАНИХ *CLDATA*

```
function [x_clean, y_clean] = cldata(x, y)
% CLEAN_DATA Cleans up duplicate voltage values in V and averages the
% corresponding current values in I.
%
% [new_data] = clean_data(V, I) identifies consecutive duplicate voltage
% values in V, averages the corresponding
% current values in I, and removes extra rows with duplicate voltage values.
% The cleaned data is sorted by voltage.
%
% Inputs:
%   V – Vector of voltage values.
%   I – Vector of current values.
%
% Outputs:
%   new_data – Nx2 matrix of cleaned data [V, I].

% Validate input dimensions
if length(x) ~= length(y)
    error('Vectors V and I must have the same length.');
```

end

```
% Ensure x and y are column vectors
if size(x, 2) > 1
    x = x'; % Convert to column vector
end
if size(y, 2) > 1
    y = y'; % Convert to column vector
end

% Combine V and I into a single matrix
data = [x, y];

% Sort rows based on the first column (voltage)
data = sortrows(data);

% Initialize variables
new_data = []; % Output matrix for cleaned data
current_row = data(1, :); % Start with the first row
sum_values = current_row; % Sum of duplicate rows
count = 1; % Counter for duplicate rows
num_duplicates = 0; % Counter for all duplicates

% Loop through the data starting from the second row
for i = 2:size(data, 1)
    if isequal(data(i, 1), current_row(1)) % If the voltage value is the
same
        sum_values = sum_values + data(i, :); % Accumulate duplicate rows
        count = count + 1; % Increment counter
        num_duplicates = num_duplicates + 1;
    else
        % Add the averaged row to the output
        new_data = [new_data; sum_values / count];

        % Update current_row to the new unique row
        current_row = data(i, :);
        sum_values = current_row; % Reset sum for the new set of
duplicates
        count = 1; % Reset the counter
    end
end
```

```

        end
    end

    % Add the last averaged row to the output
    new_data = [new_data; sum_values / count];

    % Sort rows based on the first column (voltage)
    new_data = sortrows(new_data);
    x_clean = new_data(:,1);
    y_clean = new_data(:,2);

    % Output function name and separator
    fprintf('\n=== Function: clean_data ===\n');

    % Output number of duplicates processed
    fprintf('Duplicates found: %d.\n', num_duplicates);

    % % If no duplicates were found, return the cleaned data
    % if num_duplicates == 0
    %
    %     % Output function name and separator
    %     fprintf('\n=== Function: clean_data ===\n');
    %
    %     % Output number of duplicates processed
    %     fprintf('Duplicates found: %d.\n', num_duplicates);
    %     return;
    % end
    %
    % % Output function name and separator
    % fprintf('\n=== Function: clean_data ===\n');
    %
    % % Recursively call the function if duplicates were found
    % fprintf('Duplicates found: %d. Recursing...\n', num_duplicates);
    % [x_clean, y_clean] = cldata(x_clean, y_clean);
end

```

ДОДАТОК Ж. ПРОГРАМНИЙ КОД ФУНКЦІЇ АДАПТИВНОЇ МЕДІАННОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ *DELOT*

```
function [x_clean, y_clean, outliers] = delot(x, y, threshold, window_size)
% DELOT Removes outliers from data using median filtering and MAD thresholds.
%
% [x_clean, y_clean] = delot(x, y, window_size, threshold, split_coef)
% identifies and removes outliers from the input data x and y. The
% function uses median filtering with a specified window size to smooth
% the data, calculates residuals, and removes points with residuals
% exceeding a scaled MAD threshold. The data is processed in two parts,
% divided by split_coef.
%
% Inputs:
% x - Array of x-coordinates.
% y - Array of y-coordinates.
% window_size - Size of the moving window for median filtering.
% threshold - Multiplier for the MAD threshold.
% split_coef - Coefficient to determine the split index for processing.
%
% Outputs:
% x_clean - x-coordinates without outliers.
% y_clean - y-coordinates without outliers.

% Validate input dimensions
if length(x) ~= length(y)
    error('Input vectors x and y must have the same length.');
```

end

```
% Set default values if arguments are missing
if nargin < 3 || isempty(threshold)
    threshold = 2; % Default threshold value
end

% Ensure x and y are column vectors
if size(x, 2) > 1
    x = x'; % Convert to column vector
end
if size(y, 2) > 1
    y = y'; % Convert to column vector
end

if nargin < 4 || isempty(window_size)
    % Automatically determine window size
    indices_in_range = (x >= 10) & (x <= 14); % Indices of points in range
    num_points_in_range = sum(indices_in_range); % Count points in range
    window_size = max(3, round(num_points_in_range)); % Dynamic window
size

% Ensure window size is odd
if mod(window_size, 2) == 0
    window_size = window_size + 1; % Make it odd by adding 1
end

% Ensure window size is valid
if window_size < 3 || window_size > length(y)
    error('window_size must be between 3 and the length of y.');
```

end

```
% Median filtering (right residuals)
```

```

y_r = medfilt1(y, window_size);
residuals_r = abs(y - y_r);
threshold_r = threshold * mad(residuals_r, 1);
outliers_r = residuals_r > threshold_r;

% Median filtering (left residuals)
y_l = medfilt1(y, window_size, 'truncate');
residuals_l = abs(y - y_l);
threshold_l = threshold * mad(residuals_l, 1);
outliers_l = residuals_l > threshold_l;

% Find split index based on the target value
target_value = 27; % Target X value
[~, split_index] = min(abs(x - target_value)); % Find index closest to 27

% Combine outlier masks
outliers = [outliers_l(1:split_index); outliers_r(split_index+1:end)];

% Count the number of outliers
num_outliers = sum(outliers);
total_points = length(x);

% Remove outliers and add the first point of y_l
x_clean = [x(1); x(~outliers); x(end)]; % Include the first x value
y_clean = [y_l(1); y(~outliers); y_r(end)]; % Include the first y_l value

[x_clean, y_clean] = cldata(x_clean, y_clean);

% Output function name and separator
fprintf('\n=== Function: delot ===\n');

% Output the number of removed outliers, window size, and threshold
fprintf('Removed %d outliers from a total of %d points.\n', num_outliers,
total_points);
fprintf('Dynamic window size determined: %d\n', window_size);
fprintf('Threshold multiplier used: %.2f\n', threshold);
end

```

ДОДАТОК 3. ПРОГРАМНИЙ КОД ФУНКЦІЇ РІВНОМІРНОГО РОЗПОДІЛУ *UDIST*

```
function [x_uniform, y_uniform] = udist(x, y, num_points)
% UDIST Generates uniformly distributed points along a curve.
%
% [x_uniform, y_uniform] = UDIST(x, y, num_points) takes the input
% vectors x and y representing the coordinates of a curve and returns
% new coordinates x_uniform and y_uniform with a specified number
% of points, uniformly distributed along the curve.
% Inputs:
%   x - Vector of x-coordinates of the original curve.
%   y - Vector of y-coordinates of the original curve.
%   num_points - Number of uniformly distributed points to generate.
%
% Outputs:
%   x_uniform - Vector of x-coordinates of the new uniformly distributed
%   points.
%   y_uniform - Vector of y-coordinates of the new uniformly distributed
%   points.
% Set default values if arguments are missing
if nargin < 3 || isempty(num_points)
    num_points = 200; % Default threshold value
end
% Check if input vectors have the same length
if length(x) ~= length(y)
    error('Input vectors x and y must have the same length.');
```

```
end
% Check if the number of points is at least 2
if num_points < 2
    error('num_points must be at least 2.');
```

```
end

% Calculate scaling factor for Y
scale_factor = 0.8 * max(x) / max(y);

% Apply scaling to Y
y_scaled = y * scale_factor;

% Step 1: Calculate distances between consecutive points
dx = diff(x);
dy = diff(y_scaled);
segment_lengths = sqrt(dx.^2 + dy.^2);

% Step 2: Compute the cumulative arc length along the curve
arc_length = [0; cumsum(segment_lengths)];

% Step 3: Generate uniformly spaced points along the arc length
arc_uniform = linspace(0, arc_length(end), num_points);

% Step 4: Interpolate to obtain new uniformly distributed points
x_uniform = interp1(arc_length, x, arc_uniform);
y_uniform_scaled = interp1(arc_length, y_scaled, arc_uniform);

% Step 5: Undo scaling for Y
y_uniform = y_uniform_scaled / scale_factor;
% Output function name and separator
fprintf('\n=== Function: udist ===\n');
```

```
% Output the number of points
fprintf('Number of points determined: %d\n', num_points);
end
```

ДОДАТОК И. ПРОГРАМНИЙ КОД ФУНКЦІЇ АДАПТИВНОГО КОВЗНОГО ЗГЛАДЖУВАННЯ *DYNLOWESS*

```
function y_smooth = dynlowess(x, y, window_coef)
% DYNLOWESS Applies adaptive lowess smoothing with dynamic window sizes.
%
% y_smooth = DYNLOWESS(x, y, window_coef) performs adaptive lowess
% smoothing on the input data (x, y) using a dynamically calculated window
% size. The window size is interpolated based on a predefined range of
% sizes and scaled by a user-specified coefficient.
%
% Inputs:
%   x - Vector of x-coordinates (independent variable).
%   y - Vector of y-coordinates (dependent variable).
%   window_coef - Scaling coefficient for the window size (default: 1).
%
% Output:
%   y_smooth - Smoothed y-coordinates.

% Validate input dimensions
if length(x) ~= length(y)
    error('The length of x and y must be the same.');
```

end

```
% Set default window coefficient if not provided
if nargin < 3 || isempty(window_coef)
    window_coef = 1; % Default window coefficient
end

% Define base window sizes and interpolate dynamically
window_sizes = [30, 45, 45, 30, 15, 10, 10, 10, 7, 5] * window_coef;
num_points = length(x); % Total number of points in x
x_indices = linspace(1, num_points, numel(window_sizes)); % Key points for
interpolation
dynamic_window_size = round(interp1(x_indices, window_sizes, 1:num_points,
'linear')); % Interpolated window sizes

% Initialize the smoothed output array
y_smooth = zeros(size(y));

% Apply lowess smoothing for each point with the corresponding dynamic
window size
for i = 1:length(dynamic_window_size)
    temp_smoothed = smoothdata(y, 'lowess', dynamic_window_size(i)); %
Smooth the entire data set
    y_smooth(i) = temp_smoothed(i); % Extract the smoothed value for the
current point
end

% Final pass of lowess smoothing to smooth the transition
y_smooth = smoothdata(y_smooth, 'lowess', 7);

% Output function name and separator
fprintf('\n=== Function: dynlowess ===\n');
```

% Output the number of points

```
fprintf('Window size coefficient: %d\n', window_coef);

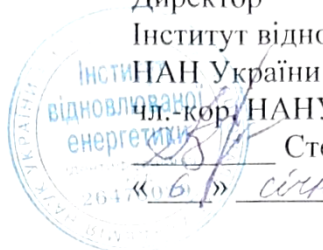
end
```


ДОДАТОК К. АКТИ ВПРОВАДЖЕНЬ ТА ВИКОРИСТАННЯ НАУКОВИХ І ПРАКТИЧНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

Інститут відновлюваної енергетики



чл.-кор. НАНУ, д.т.н., професор

Степан КУДРЯ

«06» січня 2025 р.

АКТ

використання наукових і практичних результатів дисертаційної роботи
Іванчука Владислава Юрійовича на тему «Визначення параметрів
фотоелектричних батарей в польових умовах»,
що готується на здобуття освітньо-наукового рівня доктор філософії
зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Дисертаційна робота Іванчука Владислава Юрійовича на тему «Визначення параметрів фотоелектричних батарей в польових умовах» присвячена вирішенню актуальної наукової проблеми, що полягає в якісній екстракції змінних характеристик фотоелектричних модулів в реальних умовах їх експлуатації. Ряд досліджень даної роботи виконано відповідно до договору про спільну діяльність між Національним технічним університетом України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського та Інститутом відновлюваної енергетики НАН України.

В. Ю. Іванчуком в рамках дисертаційної роботи запропоновано підхід до визначення параметрів фотоелектричних модулів шляхом побудови залежностей коефіцієнту неідеальності та зворотнього струму насичення діода від напруги, що дозволило побудувати адекватну математичну модель фотоелектричного модуля. Екстракція параметрів відбувається на базі експериментально отриманих даних розробленою в рамках дисертаційної роботи системою вимірювання вольт-амперних характеристик в польових умовах з використанням запропонованого автором комплексного алгоритму фільтрації та апроксимації експериментальних даних.

Отримані В. Ю. Іванчуком наукові та практичні результати дисертаційної роботи використано в Інституті відновлюваної енергетики при виконанні науково-дослідних робіт з шифром «Комплекс-3» (ДР № 0118U003385) та «Комплекс-Інтегро» (ДР № 0123U100782).

Заступник директора
з наукової роботи,
докт. техн. наук

Микола КУЗНЕЦОВ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан факультету

електроенерготехніки та автоматики

Національного технічного університету

України «Київський політехнічний

інститут імені Ігоря Сікорського»

доктор технічних наук, професор

Василь БУДЬКО

2025 р.

АКТ

впровадження у навчальний процес результатів дисертаційної роботи
Іванчука Владислава Юрійовича на тему «Визначення параметрів
фотоелектричних батарей в польових умовах»,
що готується на здобуття освітньо-наукового рівня доктор філософії
зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Акт складено в тому, що наукові та практичні результати дисертаційної роботи Іванчука Владислава Юрійовича на тему «Визначення параметрів фотоелектричних батарей в польових умовах» використовуються у навчальному процесі на кафедрі відновлюваних джерел енергії факультету електроенерготехніки та автоматики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Іванчук В. Ю. в рамках дисертаційної роботи розробив автономну автоматичну систему вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних модулів в реальних польових умовах експлуатації на основі мікрокомп'ютера з використанням ємнісного навантаження, моделюючі програми та програмне забезпечення для управління апаратними компонентами системи вимірювання, алгоритми виконання обробки отриманої інформації та екстракції параметрів фотоелектричних модулів.

Використання системи вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних модулів в реальних польових умовах експлуатації разом з використанням алгоритмів обробки даних дозволяє скоротити час на проведення дослідницьких робіт, підвищити точність отриманих результатів, значно розширити масив експериментальних даних, забезпечує зручний і ефективний спосіб дослідження роботи фотоелектричних модулів.

Отримані В. Ю. Іванчуком наукові та практичні результати використовуються 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.

В.о. завідувача кафедрою ВДЕ,
докт. техн. наук, професор



Олександр ОСТАПЧУК