# МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Кирисов Ігор Геннадійович

УДК 621.315.592.1

## ДИСЕРТАЦІЯ МЕТОД КІЛЬКІСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНОЇ БАТАРЕЇ

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка Галузь знань 15 Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

\_\_\_\_\_ I. Г. Кирисов

Науковий керівник: Буданов Павло Феофанович, кандидат технічних наук, доцент

#### АНОТАЦІЯ

*Кирисов І.Г.* Метод кількісного оцінювання якості параметрів сонячної батареї. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка. – Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2025.

<u>Об'єктом дослідження</u> є процес кількісного оцінювання якості параметрів структури сприймаючої поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача сонячної батареї.

<u>Предметом дослідження</u> є метод кількісного оцінювання якості параметрів структури сприймаючої поверхні фотоелектричного перетворювача сонячної батареї.

<u>Метою дослідження</u> є кількісне оцінювання якості властивостей структури сприймаючої поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача для підвищення точності, стабільності та лінійності вольт-амперної (вольт-ватної) характеристик сонячного елемента, шляхом розробки методу кількісного оцінювання параметрів реальної площі сприймаючої поверхні рельєфу напівпровідникового шару сонячного елементу із застосуванням обчислювального апарату фрактальної геометрії.

Наукова новизна одержаних результатів.

вперше:

розроблена сприймаючої геометрична модель поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача, в якій розглянуті фізичні процеси, котрі відбуваються, при зміні властивостей зовнішньої та внутрішньої структури сприймаючої фрактальної поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача за наявності локальних неоднорідностей, мікропор і макротріщин, що дозволяє врахувати точність вимірювання електрофізичних параметрів: струму короткого замикання,

напруги холостого ходу, величини вихідної потужності та коефіцієнту корисної дії, шляхом урахування зміни величини площі сприймаючої поверхні на основі використання апарату фрактальної геометрії;

#### набули подальшого розвитку:

 вдосконалені аналітичні вирази для кількісної оцінки якості параметрів моделі фотоелектричного перетворювача, які на відміну від відомих дозволяють врахувати степеневу залежність реальної площі сприймаючої поверхні, від зміни величини фрактальної розмірності в об'ємній структурі по всій товщині напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача;

#### <u>удосконалено:</u>

- метод кількісного оцінювання якості параметрів фотоелектричного перетворювача, який на відміну від відомих, дозволив врахувати підвищення точності, стабільності та лінійності вольт-амперної (вольт-ватної) характеристик на основі вимірювання величини фрактальної розмірності, яка характеризує зміну властивостей структури реальної площі сприймаючої поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача, а також призводить до зміни вихідної потужності та коефіцієнту корисної дії.

У *вступі* наведено загальну характеристику дисертаційного дослідження, його актуальність, відповідність науковим темам, визначено наукову новизну та практичне значення результатів дисертації, а також предмет та об'єкт дослідження, сформульовано мету та задачі наукового дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, наведено дані про апробацію результатів та публікації.

Перший розділ роботи присвячений аналізу моделей та методів кількісного оцінювання якості параметрів сонячних батарей. Показано, що вплив зовнішніх і внутрішніх факторів викликають ушкоджуючі дефекти на сприймаючій поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача. Проаналізовано найбільш використовувані методи кваліметрії, щодо оцінювання якості параметрів структури поверхні фотоелектричного перетворювача, для визначення їх переваг і недоліків.

Другий розділ присвячений моделюванню процесів, які відбуваються у сприймаючій поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача. Розроблена та запропонована геометрична модель сприймаючої поверхні фотоелектричного перетворювача для кількісної оцінки якості параметрів сонячного елемента, на основі застосування апарата фрактальної геометрії. Показано, що в запропонованій геометричній моделі, в результаті впливу ушкоджуючих дефектів, утворюються локальні неоднорідності, мікропори та макротріщини, та поверхня має специфічні фрактальні властивості: інваріантність, масштабованість та самоподібність, що зумовлює обґрунтування вибору ефективного параметра оцінки структурно-фазової зміни та врахування фрактальних властивостей поверхні – величини фрактальної розмірності. Визначено, що у геометричній моделі сприймаючої поверхні фотоелектричного перетворювача зміна величини реальної площі пошкодженої поверхні перебуває у ступеневій залежності від зміни величини фрактальної розмірності структури поверхневого шару фотоелектричного перетворювача. Запропоновано, для розрахунків кількісної оцінки якості критеріїв стану сприймаючої поверхні фотоелектричного перетворювача ввести обмеження та припущення, щодо геометричних прирощень, які призводять до наближених і неточних вольтамперної та вольт-ватної характеристик у системах, що використовуються для контролю параметрів сонячної батареї. Обґрунтовано, що в якості основи для розрахунків, кількісної оцінки якості критеріїв стану сприймаючої поверхні фотоелектричного перетворювача, необхідно використовувати фрактальні властивості структури матеріалу поверхні сонячного елемента та кількісну фрактальну величину – фрактальну розмірність, яка дозволяє визначити ушкоджуючі дефекти на поверхні фотоелектричного перетворювача. Отримано удосконалені аналітичні вирази моделі кількісної оцінки якості параметрів сприймаючої поверхні реальної площі напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача, з урахуванням фрактальних прирощень геометричних параметрів сприймаючої поверхні фотоелектричного перетворювача.

У третьому розділі були проведені експериментальні дослідження сприймаючої поверхні фотоелектричного перетворювача за допомогою фрактального методу кваліметрії, які підтвердили залежність реальної площі сприймаючої поверхні фотоелектричного перетворювача від отриманих розрахунків фрактальної розмірності. величини Експериментально підтверджено залежності мінімальної потужності, коефіцієнту корисної дії, вхідних та вихідних параметрів сонячного елементу від фрактальної розмірності перетворювача. структури сприймаючої поверхні фотоелектричного Підтверджено адекватність одержаних теоретичних досліджень, щодо вдосконалення моделі кількісної оцінки якості сприймаючої поверхні фотоелектричного перетворювача.

Четвертий розділ присвячений практичному впровадження кваліметричного методу кількісного оцінювання параметрів сонячних батарей при експлуатації сонячної електростанції. Запропонована та впроваджена удосконалена комплексна методика по розрахунку обладнання сонячної електростанції (СЕС) для резервування споживачів власних потреб Харківської ТЕЦ № 5, з використанням автоматизованого робочого місця оператора (АРМо) автоматизованої системи управління (АСУ) сонячної електростанції (СЕС). Запропоновано систему безперервного моніторингу, в режимі реального часу, параметрів сонячної батареї для АРМо АСУ СЕС для виявлення дефектів в структурі сприймаючої поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, а також розроблене методичне, математичне, метрологічне-інструментальне та забезпечення, знайшли апробацію апаратно-програмне практичну у випробувальних стендах та науково-дослідних лабораторіях на Харківській сонячної електростанції, а також у навчальному процесі, при проведенні занять, кафедри електротехніки та електроенергетики навчально-наукового інституту «Українська інженерно-педагогічна академія» Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна з дисциплін: «Фотоелектричні станції та засоби накопичення електричної енергії»; «Концепції сталого розвитку та енергетичної безпеки»; «Аналіз і моделювання процесів в електричних системах та об'єктах»; «Системи розподіленої генерації».

**Ключові слова**: метод кількісного оцінювання якості, кваліметрія, кваліметричні методи, оцінка, якість, кількість, вимірювання, поверхня, інформаційно-вимірювальна система, сонячний елемент

#### ANNOTATION

*Kyrysov I.G.* Method of quantitative assessment of the quality of solar battery parameters. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 152 Metrology and information and measuring equipment. – V. N. Karazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2025.

<u>The object of the study</u> is the process of quantitatively assessing the quality of the parameters of the structure of the receptive surface of the semiconductor layer of the photovoltaic converter of a solar cell.

<u>The subject of the study</u> is a method of quantitatively assessing the quality of the parameters of the structure of the receptive surface of the photovoltaic converter of a solar cell.

<u>The purpose of the study</u> is to quantitatively assess the quality of the properties of the structure of the receptive surface of the semiconductor layer of the photovoltaic converter to improve the accuracy, stability and linearity of the volt-ampere (volt-watt) characteristics of the solar cell, by developing a method of quantitatively assessing the parameters of the real area of the receptive surface of the relief of the semiconductor layer of the solar cell using a fractal geometry computer.

Scientific novelty of the results obtained.

#### for the first time:

- a geometric model of the receiving surface of the semiconductor layer of the photovoltaic converter was developed, which considered the physical processes that occur when the properties of the external and internal structure of the receiving fractal surface of the semiconductor layer of the photovoltaic converter change in the presence of local inhomogeneities, micropores and macrocracks, which allows us to take into account the accuracy of measuring electrophysical parameters: short-circuit current, open-circuit voltage, output power and efficiency, by taking into account the change in the area of the receiving surface based on the use of the fractal geometry apparatus;

#### further developed:

- improved analytical expressions for quantitative assessment of the quality of the parameters of the photovoltaic converter model, which, unlike the known ones, allow us to take into account the power dependence of the real area of the receiving surface on the change in the fractal dimension in the volumetric structure throughout the thickness of the semiconductor layer of the photovoltaic converter;

#### <u>improved:</u>

- a method for quantitatively assessing the quality of the parameters of a photovoltaic converter, which, unlike the known ones, allowed us to take into account the increase in accuracy, stability and linearity of the volt-ampere (volt-watt) characteristics based on measuring the value of the fractal dimension, which characterizes the change in the properties of the structure of the real area of the receiving surface of the semiconductor layer of the photovoltaic converter, and also leads to a change in the output power and efficiency.

The introduction provides a general description of the dissertation research, its relevance, compliance with scientific topics, determines the scientific novelty and practical significance of the results of the dissertation, as well as the subject and object of the research, formulates the goal and objectives of the scientific research, shows the connection of the work with scientific programs, plans, topics, provides data on the testing of results and publications.

The first section of the work is devoted to the analysis of models and methods for quantitatively assessing the quality of solar cell parameters. It is shown that the influence of external and internal factors causes damaging defects on the receiving surface of the semiconductor layer of the photovoltaic converter. The most commonly used qualimetry methods for assessing the quality of the parameters of the structure of the surface of the photovoltaic converter are analyzed to determine their advantages and disadvantages.

The second section is devoted to modeling the processes that occur in the receiving surface of the semiconductor layer of the photovoltaic converter. A geometric model of the receiving surface of a photovoltaic converter has been developed and

proposed for quantitative assessment of the quality of the parameters of a solar cell, based on the use of the fractal geometry apparatus. It has been shown that in the proposed geometric model, as a result of the influence of damaging defects, local inhomogeneities, micropores and macrocracks are formed, and the surface has specific fractal properties: invariance, scalability and self-similarity, which justifies the choice of an effective parameter for assessing the structural-phase change and taking into account the fractal properties of the surface - the value of the fractal dimension. It has been determined that in the geometric model of the receiving surface of a photovoltaic converter, the change in the value of the real area of the damaged surface is in a stepwise dependence on the change in the value of the fractal dimension of the structure of the surface layer of the photovoltaic converter. It is proposed to introduce restrictions and assumptions regarding geometric increments for the calculations of the quantitative assessment of the quality of the criteria for the state of the receiving surface of the photovoltaic converter, which lead to approximate and inaccurate volt-ampere and volt-watt characteristics in systems used to control the parameters of the solar cell. It is justified that as a basis for the calculations of the quantitative assessment of the quality of the criteria for the state of the receiving surface of the photovoltaic converter, it is necessary to use the fractal properties of the structure of the material of the surface of the solar cell and the quantitative fractal value - fractal dimension, which allows to determine the damaging defects on the surface of the photovoltaic converter. Improved analytical expressions of the model for the quantitative assessment of the quality of the parameters of the real area of the receiving surface of the semiconductor layer of the photovoltaic converter, taking into account the fractal increments of the geometric parameters of the receiving surface of the photovoltaic converter, are obtained.

In the third section, experimental studies of the receiving surface of the photovoltaic converter were carried out using the fractal method of qualimetry, which confirmed the dependence of the real area of the receiving surface of the photovoltaic converter on the obtained calculations of the value of the fractal dimension. The dependences of the minimum power, efficiency, input and output parameters of the solar cell on the fractal dimension of the structure of the receiving surface of the

photovoltaic converter were experimentally confirmed. The adequacy of the obtained theoretical studies was confirmed in terms of improving the model for quantitative assessment of the quality of the receiving surface of the photovoltaic converter.

The fourth section is devoted to the practical implementation of the qualimetric method of quantitative assessment of solar battery parameters during the operation of a solar power plant. An improved comprehensive methodology for calculating the equipment of a solar power plant (SPP) for reserving consumers for their own needs of Kharkiv CHP No. 5 is proposed and implemented, using the automated operator's workstation (AWMO) of the automated control system (ACS) of a solar power plant (SPP). A system for continuous monitoring, in real time, of solar battery parameters for the AWMO of the SPP ACS to detect defects in the structure of the receiving surface of the semiconductor layer of the photovoltaic converter is proposed.

The results of theoretical and experimental research, as well as the developed methodological, mathematical, metrological-instrumental and hardware-software support, have found practical approbation in test stands and research laboratories at the Kharkiv Solar Power Plant, as well as in the educational process, during classes, at the Department of Electrical Engineering and Power Engineering of the Educational and Scientific Institute "Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy" of the V. N. Karazin Kharkiv National University in the disciplines: "Photoelectric plants and means of accumulating electrical energy"; "Concepts of sustainable development and energy security"; "Analysis and modeling of processes in electrical systems and facilities"; "Distributed generation systems".

**Keywords:** method of quantitative quality assessment, qualimetry, qualimetric methods, assessment, quality, quantity, measurement, surface, information and measuring system, solar cell

### СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

# Статті у наукових фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science:

1. Budanov P., **Kyrysov I.,** Brovko K., Rudenko D., Vasiuchenko, P., Nosyk, A. Development of a Solar Element Model Using the Method of Fractal Geometry Theory. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3, no. 8(111). P. 75–89. (Scopus). DOI: 10.15587/1729-4061.2021.235882

URL: https://journals.uran.ua/eejet/article/view/235882/234620 ISSN: 1729-3774

2. Budanov P., Khomiak E., **Kyrysov I.,** Brovko K., Kalnoy S., Karpenko O. Building a model of damage to the fractal structure of the shell of the fuel element of a nuclear reactor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 4, № 8(118). P. 60-70 (Scopus). DOI: 10.15587/1729-4061.2022.263374

URL: <u>https://journals.uran.ua/eejet/article/view/263374/259840</u> ISSN: 1729-3774

#### Статті у наукових фахових виданнях України:

3. Кирисов І. Г., Буданов П. Ф., Хом'як Е. А., Бровко К. Ю. Підходи та вимоги до моделювання структури напівпровідникового шару сонячного елемента. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2022. № 1. С. 35-38. DOI: 10.31649/1997-9266-2022-160-1-35-38

URL: https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/2730/2555

(Особистий внесок здобувача: запропоновано для розрахунку величини реальної площі сприймаючої поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача, використати зміни властивостей внутрішньої структури напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача Проведено дослідження моделі сонячного фотоелектричного перетворювача з урахуванням загальної геометричної площі поверхневого напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача. Побудовані вольт-амперні характеристики фотоелектричного перетворювача з геометричною площею та з реальними площами поверхні.

Особистий внесок Буданова П. Ф.: перевірка наукової достовірності отримуваних результатів, редагування. Відповідні результати є матеріалами публікації.

Особистий внесок Хом'яка Е. А.: попередня обробка та аналіз даних з їх візуалізацією, результати наведені у відповідній частині роботи.

Особистий внесок Бровка К. Ю.: аналіз моделей сонячних елементів. Відповідні результати є матеріалами публікації).

4. **Кирисов I. Г.,** Буданов П. Ф. Методи досліджень поглинаючої поверхні сонячних елементів. *Машинобудування*. 2022. № 29. С. 104-117. DOI: 10.32820/2079-1747-2022-29-104-117

URL: https://jmash.uipa.edu.ua/index.php/jMASH/article/view/291/215

(Особистий внесок здобувача: розглянуті та проаналізовані основні вимоги до тонкоплівкових сонячних елементів проведено аналіз методів дослідження фізичних процесів у структурі напівпровідникового шару сонячного елемента. Запропоновано, розглянути дослідження фізичних процесів у структурі напівпровідникового шару сонячного елемента, а також вивчення фізичних властивостей тонких плівок для сонячного елемента, на основі наступних основних методів дослідження: сканувальна зондова (ємнісна) і тунельна мікроскопія (спектроскопія); атомна силова мікроскопія; рентгеноскопія; електронний мікроаналіз; сканувальна електронна мікроскопія; еліпсометрія; спектроскопічна еліпсометрія; електронна оже-спектроскопія; масспектрометрія вторинних іонів; фотолюмінісценція ; сканувальна лазерна мікроскопія.

Особистий внесок Буданова П. Ф.: перевірка наукової достовірності отримуваних результатів, редагування. Відповідні результати є матеріалами публікації.) 5. Budanov P., **Kyrysov I.** Qualimetric method of quality assessmentof solar battery parameters. *Машинобудування*. 2024. № 33. С. 64-77. DOI: 10.32820/2079-1747-2024-33-64-77

URL: http://repo.uipa.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/8399/1/64-77.pdf

(Особистий внесок здобувача: попередня обробка та аналіз даних з їх візуалізацією, розробка кваліметричного методу оцінки параметрів фотоелектричного перетворювача сонячної батареї, який дозволяє підвишувати точність, стабільність вольт-амперної та вольт-ватної характеристик і визначити реальне значення величини вихідної потужності та ККД фотоелектричного перетворювача. Отримані аналітичні вирази, для обчислення вихідних параметрів, з врахуванням реальних геометричних структурних змін поверхневого шару фотоелектричного перетворювача, при наявності ушкоджуючих дефектів в вигляді макро- та мікротріщин и локальних неоднорідностей. Проведення експериментальних досліджень. Розробка алгоритму побудови математичної моделі фотоелектричного перетворювача сонячної батареї у системах схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink с сприймаючої Проведення врахуванням площі активної поверхні. обчислювального експерименту у системах схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink, який підтвердив вплив геометричних характеристик поверхневого шару фотоелектричного перетворювача на його вихідні параметри.

Особистий внесок Буданова П. Ф.: перевірка наукової достовірності отримуваних результатів, редагування. Відповідні результати є матеріалами публікації.)

#### Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Кирисов І. Г. Аналіз факторів, які впливають на структуру напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача в процесі експлуатації. *Актуальні проблеми сучасної науки, суспільства та освіти*: збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції. Харків,

2021 C. 394–397.

7. **Кирисов І. Г.,** Чернюк А. М., Качанов Є. І. Засоби забезпечення процесу генерації та споживання електричної енергії в електроенергетичних системах з розподіленою генерацією з урахуванням фактору невизначеності погодних та кліматичних умов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність.* 2020. № 1. С. 95–99.

8. **Кирисов І. Г.,** Буданов П. Ф., Дослідження причин поверхневих дефектів напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача. *V* Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність та енергетична безпека електро енергетичних систем. Тези доповідей. 2021. С. 41.

9. Кирисов І. Г. Дослідження якості напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача процесі експлуатації. *Міжнародна науково-практична конференція «Якість, стандартизація та метрологічне забезпечення»*. Збірник матеріалів конференції. Харків: 2022. С. 47.

10. **Кирисов І. Г.,** Буданов П. Ф., Хом'як Е. А., Бровко К. Ю. Підходи та вимоги для моделювання структури рельєфу напівпровідникового шару сонячного елементу. *V Міжнародна науково-технічна конференція "Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2021)"*. Збірник наукових праць. Вінниця: "ВНТУ", 2021. С. 112–113.

11. Кирисов І. Г. Аналіз факторів, які впливають на структуру напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача в процесі експлуатації. *VI Міжнародна науково- практична конференція «Проблеми сучасної науки та освіти»*. Матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції. Харків, 2021.– С. 394.

12. Кирисов І. Г. Аналіз факторів, які впливають на структуру напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача в процесі експлуатації сонячних електростанцій. *Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні дослідження у світовій науці»*. Тези доповідей. Львів, 2022. С. 305–309.

13. Кирисов І. Г. Аналіз пошкоджень поверхні сонячних панелей, що

виникають в процесі експлуатації сонячних електростанцій. *IX Міжнародна* науково-практична конференція «Сучасні дослідження у світовій науці». Тези доповідей. Львів 2022., Р. 487-491.

14. Кирисов І. Г. Вплив пошкоджень поверхні сонячних панелей на їх параметри. *Х Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні дослідження у світовій науці»*. Доповіді Х Міжнародної науково-практичної конференції. Львів, 2022. С. 407–411.

15. Кирисов І. Г. Аналіз пошкоджень фотоелектричних модулів в процесі експлуатації сонячних електростанцій. *Національний науково-практичний форум «Наука. Інновації. Якість»*. Матеріали національного науково-практичного форуму. Харків, 2022. С. 52–54.

16. Кирисов І. Г. Моделювання фотоелектричних перетворювачів сонячних модулів з метою визначення їх параметрів і характеристик. *Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації»*. Збірник наукових праць. Переяслав, 2024. С. 216-219.

17. **Кирисов І. Г.,** Гонтар І. В., Федченко-Галаган Є. С. Аналіз методів дослідження структури поверхні сонячних елементів. *VII Міжнародна науково-практична конференція «Перспективи сучасної науки: теорія і практика» (19-21 серпня 2024 р.).* Матеріали 7 міжнародної науково-практичної конференції. Львів, 2024. С. 201-204.

18. **Кирисов І. Г.**, Левченко М. І., Сук І. В., Хватова С. В. Вплив мікротріщин на поверхні сонячних батарей на їх параметри. *VII Міжнародна науково-практична конференція «Перспективи сучасної науки: теорія і практика» (19-21 серпня 2024 р.)*. Матеріали 7 міжнародної науково-практичної конференції. Львів. 2024. С. 205-208.

19. Кирисов І. Г., Чернюк А.М., Черевик Ю.О. Особливості технологічних схем генерації електроенергії альтернативними джерелами енергії. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». Харків: ХНТУСГ. 2019. № 204. С. 66–68.

20. **Кирисов І. Г.,** Чернюк А.М., Сук І.В. Карлова О.М. Білоус І.О. Аналіз технологічних схем генерації електроенергії альтернативними джерелами енергії Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2019. Том 30(69). № 4. С. 33–41.

21. **Кирисов І. Г.,** Чернюк А.М., Черевик Ю.О. Аналіз перспектив розвитку систем розподіленої генерації електроенергії в Україні. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2021. Том 32 (71). № 3. С. 239–246.

#### Монографії:

22. Кирисов І. Г., Буданов П. Ф., Хом'як Е. А. Фрактально-кластерний метод контролю оболонки тепловиділяючого елемента ядерного реактора. Achievements of Ukraine and EU countries in technological innovations and invention: Scientific monograph. Riga, Latvia: «Baltija Publishing», 2022. Р. 136–150.

DOI: 10.30525/978-9934-26-254-8-4

http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/book/268

## **3MICT**

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ 1				
ВСТУП				
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ КІЛЬКІСНОГО				
ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ				
1.1	Загальні відомості про конструкцію та основні характеристики 27			
	сонячних елементів та сонячних батарей			
1.2	Аналіз зовнішніх і внутрішніх факторів, що викликають	37		
	ушкоджуючі дефекти, на сприймаючій поверхні			
	напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача			
1.3	Аналіз існуючих підходів для моделювання якісних	46		
	характеристик сонячного елемента			
1.4	Аналіз використання методів кваліметрії для оцінювання якості	58		
	параметрів структури поверхні сонячного елемента			
Висновки до першого розділу 7				
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДУ КІЛЬКІСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ				
ПАРАМІ	ЕТРІВ СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА			
2.1	Розробка геометричної моделі сприймаючої поверхні	72		
	фотоелектричного перетворювача на основі застосування апарата			
	фрактальної геометрії			
2.2	.2 Удосконалення аналітичних виразів моделі сонячного елемента			
	для методу оцінювання якості параметрів структури сприймаючої			
	поверхні фотоелектричного перетворювача			
Висновки до другого розділу				
РОЗДІЛ	3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНІ	83		
СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ КІЛЬКІСНОГО				

ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПАРАМЕТРІВ

- 3.1 Порядок проведення експериментальних досліджень на 83 фізичній моделі сонячного елемента
- 3.2 Удосконалення методу кількісного оцінювання якості 100 параметрів сонячного елемента
- 3.2.1 Дослідження залежності реальної площі сприймаючої поверхні 100 фотоелектричного перетворювача від фрактальної розмірності
- 3.2.2 Дослідження залежності мінімальної потужності 102 фотоелектричного перетворювача від фрактальної розмірності
- 3.2.3 Дослідження залежності вихідних параметрів від реальної 103 площі сприймаючої поверхні фотоелектричного перетворювача
- 3.3 Обговорення результатів експериментальних досліджень 104 сприймаючої поверхні фотоелектричного перетворювача на основі застосування апарата фрактальної геометрії

Висновки до третього розділу..... 107

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ 109 МЕТОДУ КІЛЬКІСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ СЕС

- 4.1 Впровадження розробленого методу кількісного оцінювання 109 якості параметрів сонячної батареї
- 4.2 Удосконалення методики розрахунку потужності сонячної 116 електростанції для резервування споживачів власних потреб Харківської ТЕЦ-5
- 4.3 Розробка системи безперервного моніторингу якості параметрів 123 сонячної батареї для оператора АРМо АСУ СЕС

Висновки до четвертого розділу	128
ВИСНОВКИ	129
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	133
ДОДАТКИ	144

### ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

- АРМо автоматизоване робоче місце оператора
- ВАХ вольт-амперна характеристика;
- BBX вольт-ватна характеристика;
- IЧТ інфрачервона термографія;
- КЗ коротке замикання;
- ККД коефіцієнт корисної дії;
- НПШ напівпровідниковий шар
- СЕС сонячна електростанція.
- СБ сонячна батарея;
- СЕ сонячний елемент;
- ФР фрактальна розмірність;
- ФС фрактальна структура;
- ФЕП фотоелектричний перетворювач;

#### ВСТУП

Актуальність теми. При тривалій експлуатації сонячних батарей (СБ) відзначається значне зниження їх продуктивності через погіршення основних параметрів: коефіцієнта корисної дії (ККД) і вихідної потужності [36,48,50,52].

Так, по оцінці закордонних фахівців [8,11,15], близько 90% ринку СБ, на даний час, становлять кристалічні кремнієві СБ, які втрачають від 10% до 40% вихідної потужності, у перші два роки експлуатації. Тому, необхідно враховувати такі зовнішні фактори, що впливають на продуктивність СБ, як нормальна деградація структури поверхні СБ із часом, зниження потужності за рахунок надмірного нагрівання СБ або їхнього затінення [50]. Вплив цих і інших факторів, може мінятися залежно від сезону, географічного положення, способу монтажу, азимута та нахилу СБ [40].

Практика експлуатації СБ показує [40,48,52], що в реальних умовах, СБ буде виробляти близько 75...85% від її пікової потужності, зазначеної виробником. Наприклад, СБ із потужністю 100 Вт, розташована під оптимальним кутом і орієнтована на південь, буде видавати влітку в середньому 75...85 Вт, залежно від методу установки. Тому, при зборці СБ побудови сонячної електростанції (СЕС), необхідно враховувати повну пікову потужність від СБ. Крім того потужність СБ змінюється залежно від освітленості та практично прямо пропорційна її значенню [14,16]. Однак, при деякому значенні освітленості СБ може припинити вироблення. Наприклад, для кристалічних СБ це, приблизно, 150...200 Вт/м<sup>2</sup>, а для аморфних – близько 100 Вт/м<sup>2</sup> [65,68].

В роботах [56,62] показано, що потужність СБ залежить від її температури й звичайно падає при її підвищенні. При підвищенні температури СБ на кожний градус, її потужність зменшується на 0,45%.

Аналіз проблеми погіршення параметрів СБ в літературних джерелах [36,48,50,52] показав, що це визначається, нестабільністю вихідних параметрів сонячних елементів (СЕ), з яких збирається СБ. Це може бути викликано наступними факторами: низькою якістю матеріалів при їх виробництві, ступенем

герметизації батареї і якістю захисних властивостей плівки і т.д. [32,46,56].

До більше серйозних наслідків при експлуатації СБ, приводить виникнення, ушкоджуючих дефектів (відколи, мікротріщини, макропори, локальні неоднорідності) на сприймаючій поверхні напівпровідникового шару (НПШ) фотоелектричного перетворювача (ФЕП), які приводять до підвищення внутрішнього опору [48,50,52].

Аналіз причини появи таких ушкоджуючих дефектів поверхні ФЕП показує, що дефекти можуть спочатку розрізнятися та мати різну природу, однак вони усі суттєво впливають на внутрішню структуру напівпровідникового шару ФЕП [33-35]. У свою чергу, зміни в структурі НПШ ФЕП, викликають відхилення встановлених внутрішніх параметрів (фотоструму, напруги холостого ходу, струму короткого замикання, внутрішнього опору), які впливають на вихідну потужність і ККД СЕ [36,65,68].

На сьогоднішній день, використовуються в основному моделі СЕ [14-18,21,23,26,31], що дозволяють відображати сімейство вольт-амперних (BAX) і вольт-ватних (BBX) характеристик СЕ, залежно від рівня інтенсивності сонячного випромінювання та температури.

Однак, у таких моделях [42,53,75,80-83], для опису основних параметрів СЕ, досить часто використовуються численні обмеження та допущення у відношенні реальної фактичної поверхні НПШ ФЕП. Тому наслідки цих обмежень і допущень необхідно спостерігати з деяким ступенем наближення відхилення характеристик параметрів для значень ВАХ і ВВХ СЕ.

В роботах [44,45,48,50,52,60] показано, що при низькій якості виготовлення СБ, з часом виникають дефекти в зовнішній та внутрішній структури рельєфу НПШ ФЕП, які значно впливають на один з основних параметрів СБ - коефіцієнт заповнення ВАХ, по якому можна визначити стан сприймаючої робочої поверхні НПШ ФЕП.

Аналіз літературних джерел [36,48,50,52,60,61,65,68] показує, що через дефекти на поверхні НПШ ФЕП, можуть виникати втрати сонячної енергії, які приведуть до нестабільності та нелінійності вольт-амперної (вольт-ватної) характеристик. При цьому, значно може знижуватися величина вихідної потужності та ККД, на відміну від значень, установлених виробником СБ. Отже, у моделях при розрахунку параметрів СЕ, при моделюванні фізичних процесів, що протікають на поверхні та у структурі НПШ ФЕП, необхідно враховувати, як геометричну площу поверхні, так і реальну сприймаючу площу поверхні з врахуванням ушкоджуючих дефектів. Також відомо [34,35,37], що такі поверхні з ушкоджуючими дефектами, мають неоднорідну та пористу структуру, відповідно [40] мають фрактальні властивості самоподібності і масштабованості та характеризується кількісною величиною - фрактальною розмірністю [40]. Тому, при проведенні дослідження, для визначення та розрахунку площі реальної сприймаючої поверхні НПШ ФЕП, запропоновано використовувати обчислювальний апарат фрактальної геометрії.

Актуальність теми дослідження зумовлена необхідністю підвищення точності, стабільності та лінійності вольт-амперної і вольт-ватної характеристик сонячного елемента, шляхом кількісного врахування стану сприймаючої поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача. У процесі експлуатації відбувається ушкодження мікроструктури шару: утворення мікропор, макротріщин та інших локальних неоднорідностей, що знижують ефективність перетворення сонячної енергії. Тому надзвичайно важливо розробити метод кількісного оцінювання геометричних параметрів реальної поверхні сприймаючого шару із використанням обчислювального апарату фрактальної геометрії.

Дисертаційна робота спрямована на створення науково обґрунтованого методу, що дозволяє врахувати мікроструктурні особливості реальної поверхні сонячного елемента та їх вплив на його робочі характеристики, що є важливою передумовою підвищення ефективності сучасних фотоелектричних систем.

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

Дисертаційна робота виконана в рамках наукових досліджень кафедри електротехніки та електроенергетики навчально-наукового інституту «Українська інженерно-педагогічна академія» Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, зокрема за темою:

«Розроблення проєкту сонячної панелі на основі моделювання поверхні сонячного елемента із застосуванням фрактальної геометрії» (державний реєстраційний номер: 0122U200539);

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є кількісне оцінювання якості властивостей структури сприймаючої поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача для підвищення точності, стабільності вольт-амперної та лінійності вольт-ватної характеристик сонячного елемента, шляхом розробки методу кількісного оцінювання параметрів реальної площі сприймаючої поверхні рельєфу напівпровідникового шару сонячного елементу з урахуванням фрактальних властивостей поверхні на основі застосуванням обчислювального апарату фрактальної геометрії.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

 провести структурно-геометричний аналіз та оцінювання параметрів структурі напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача сонячної батареї, шляхом розробки фізичної моделі та визначивши геометричні параметри сприймаючої поверхні сонячного елемента.

– удосконалити аналітичні вирази для кількісного оцінювання якості параметрів сонячного елемента, на основі врахування структури ФЕП, а також зміни фрактальних геометричних параметрів поверхні ФЕП та степеневої залежності реальної площі сприймаючої поверхні, в залежності від зміни величини фрактальної розмірності в об'ємній структурі по всій товщині напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача;

– вибрати ефективний параметр кількісної оцінки якості структури в вигляді величини фрактальної розмірності та провести обчислювальний експеримент, для побудови вольт-амперних та вольт-ватних характеристик сонячного елемента, з урахуванням його реальної сприймаючої площі поверхні, та підтвердити вплив зміни геометричних характеристик фактичної поверхні ФЕП на електричні характеристики параметрів сонячного елемента.

Об'єкт дослідження – є процес кількісного оцінювання якості параметрів

структури сприймаючої поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача сонячної батареї.

Предмет дослідження – метод кількісного оцінювання якості параметрів структури сприймаючої поверхні фотоелектричного перетворювача сонячної батареї.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань, використовувалися сучасні аналітичні методи математичного моделювання, математичний апарат фрактально-кластерної геометрії, а також методи математичної статистики для обробки експериментальних даних.

#### Наукова новизна одержаних результатів.

<u>вперше:</u>

розроблена геометрична модель сприймаючої поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача, в якій розглянуті фізичні процеси, котрі відбуваються, при зміні властивостей зовнішньої та внутрішньої структури сприймаючої фрактальної поверхні напівпровідникового фотоелектричного перетворювача за наявності шару локальних неоднорідностей, мікропор і макротріщин, що дозволяє врахувати точність вимірювання електрофізичних параметрів: струму короткого замикання, напруги холостого ходу, величини вихідної потужності та коефіцієнту корисної дії, шляхом урахування зміни величини площі сприймаючої поверхні на основі використання апарату фрактальної геометрії;

#### <u>набули подальшого розвитку:</u>

- вдосконалені аналітичні вирази для кількісної оцінки якості параметрів моделі фотоелектричного перетворювача, які на відміну від відомих дозволяють врахувати степеневу залежність реальної площі сприймаючої поверхні, від зміни величини фрактальної розмірності в об'ємній структурі по всій товщині напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача;

#### <u>удосконалено:</u>

- метод кількісного оцінювання якості параметрів фотоелектричного перетворювача, який на відміну від відомих, дозволив врахувати підвищення

точності, стабільності та лінійності вольт-амперної (вольт-ватної) характеристик на основі вимірювання величини фрактальної розмірності, яка характеризує зміну властивостей структури реальної площі сприймаючої поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача, а також призводить до зміни вихідної потужності та коефіцієнту корисної дії.

#### Практичне значення одержаних результатів.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, шо експериментально розроблений метод кількісного оцінювання якості параметрів, може бути застосований при експлуатації сонячних станцій, для виявлення місцезнаходження, типу та розміру ушкоджуючих дефектів на поверхні сонячної батареї, а також може бути використаним при виготовлені фотоелектричних перетворювачів і при тривалій експлуатації СБ. Результати теоретичних та експериментальних досліджень, алгоритм інформаційно-вимірювального модуля виявлення дефектів, системи контролю поверхні ФЕП, а також розроблене методичне, математичне, метрологічно-інструментальне та апаратно-програмне забезпечення, можуть знайти практичну апробацію на сонячних станціях України.

Основні положення дисертації, можуть бути використані у навчальному процесі кафедри електротехніки та електроенергетики ННІ «Українська інженерно-педагогічна академія», Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна при проведенні занять з дисциплін: «Фотоелектричні станції та засоби накопичення електричної енергії»; «Концепції сталого розвитку та енергетичної безпеки»; «Аналіз і моделювання процесів в електричних системах та об'єктах»; «Системи розподіленої генерації».

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати отримано здобувачем самостійно. Наукові положення, що виносяться на захист, та висновки дисертаційної роботи належать автору.

У роботах, опублікованих у співавторстві:

– розглянуто методи дослідження поверхні ФЕП [12];

– запропоновано використання фрактальної моделі пошкодження поверхні
 ФЕП на основі обчислювального апарату фрактальної геометрії [40];

запропоновано використання кваліметричного методу для оцінки параметрів СЕ [39];

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати досліджень доповідалися на наукових конференціях: III Міжнародна науковотехнічна конференція "Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2019)" (Харків, 2019); Міжнародна науковопрактична конференція "Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2021); Міжнародна науково-практична 2021)". (Вінниця, конференція "Проблеми сучасної науки та освіти" (Lviv, 2021); International scientific and practical conference "Modern research in world science" (Lviv, 2022); Національний науково-практичний форум "Наука. Інновації. Якість" (Харків, 2022); International scientific and practical conference "Perspectives of contemporary science: theory and practice" (Lviv, 2021); Міжнародна науково-практична інтернет-конференція "Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації" (Переяслав, 2024).

Публікації результатів дисертації. Результати досліджень, що подані в дисертації, опубліковані у 22 наукових працях, у тому числі у 5 статтях у наукових фахових виданнях (з них 2 – статтях у наукових виданнях, які входить до наукометричної бази Scopus; 1 – стаття (розділ монографії) в країні ЄС; 3 статті у наукових фахових виданнях України); у наукових виданнях, апробаційного характеру 4 статті та 12 тез доповідей в збірниках конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний об'єм дисертаційної роботи становить 158 сторінок, з них обсяг основного тексту – 112 сторінок: 1 ілюстрація на 1 окремій сторінці, 44 ілюстрацій по тексту, 16 таблиць по тексту, 3 додатки на 15-ти сторінках, список використаних джерел із 88 найменувань на 11-ти сторінках.

#### **РОЗДІЛ 1**

## АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ КІЛЬКІСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

# 1.1 Загальні відомості про конструкцію та основні характеристики сонячних елементів та сонячних батарей

Сонячна батарея (СБ) складається з низки з'єднаних між собою СЕ, інкапсульованих в єдиний, довговічний, стабільний блок (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Конструкція сонячної батареї

Головна мета інкапсуляції набору електрично з'єднаних CE – захистити їх та їхні з'єднувальні дроти від зазвичай суворого зовнішнього середовища, в якому вони працюють. Необхідність цього обумовлена також тим, що CE відносно тонкі, схильні до механічних пошкоджень, якщо вони не захищені. Крім того, металева сітка на верхній поверхні CE та шини, що з'єднують окремі комірки, можуть піддаватися корозії водою або водяним паром. Тому основними функціями інкапсуляції є запобігання механічних пошкоджень та корозії електричних контактів. Термін служби СБ становить понад 20 років, що свідчить про надійність інкапсульованого СБ. Згідно з типовою гарантією модуль досягає 90 % номінальної потужності протягом перших 10 років і 80 % номінальної потужності протягом 25 років.

Більшість об'ємних кремнієвих СБ складаються (рис. 1.1) з прозорої верхньої поверхні, інкапсулятора, набору СЕ, тильної пластини та рамки навколо зовнішнього краю. В більшості СБ верхня поверхня – скло, інкапсулятор зроблений з етиленвінілацетату (EVA), а тильна поверхня виготовлена з полівінілфториду (PVF) – термопластичного фторполімерного матеріалу, який має високу атмосферостійкість, механічну міцність і низьку проникність вологи та масла [8,11,15].

Матеріал лицьової поверхні повинен мати високий коефіцієнт пропускання світла в діапазоні довжин хвиль від 350 нм до 1200 нм. Крім того, коефіцієнт відбиття від лицьової поверхні має бути низьким. Відбиття сонячного світла можна зменшити за допомогою нанесення антивідбивного покриття на лицьову поверхню, але таке покриття недостатньо міцне, щоб витримати умови, в яких використовується більшість СБ. Альтернативним методом зменшення відбиття є текстурування поверхні, яке надає поверхні шорсткість.

В більшості СБ передня поверхня має достатню міцність, а задня поверхня – механічну жорсткість, щоб підтримувати важкий модуль на кронштейнах. Існує кілька варіантів матеріалу лицьової поверхні, це звичайно акрил, полімери та скло. Найчастіше використовується загартоване скло з низьким вмістом заліза, оскільки воно є недорогим, міцним, стабільним, непроникним для води та газів і має хороші властивості самоочищення.

Інкапсулятор забезпечує зчеплення між СЕ, лицьовою поверхнею та тильною поверхнею СБ. Матеріал інапсулятора має бути стабільним у разі підвищеної температури та стійким до дії ультрафіолету. Крім того, він має бути оптично прозорим із низьким термічним опором (для ефективного відведення тепла). В якості такого матеріалу найбільш часто використовується етиленвінілацетат. EVA випускається у вигляді тонких листів, які вставляють між набором СБ і верхньою та задньою поверхнею.

Щільність упаковки СЕ впливає на вихідну потужність СБ, а також на його робочу температуру. Ця щільність залежить від форми використовуваних СЕ: монокристалічні СЕ круглі або напівквадратні, а полікристалічні, зазвичай, квадратні. Саме квадратні СЕ забезпечують високу щільність упаковки комірок у модулі. Форма СЕ визначається звичайно технологією виробництва злитків напівпровідникового матеріалу. Монокристалічний кремній отримується за допомогою кристалізації за методом Чохральського та має форму циліндричних злитків, які потім нарізаються в круглі пластини. Для підвищення щільності упаковки циліндри з краю обрізаються та з них потім нарізають напівквадратні пластини СЕ. На відміну від вирощування монокристалів у вигляді циліндричної заготовки, полікристалічний матеріал відразу відливають у тиглях з квадратною основою.

Тильна поверхня СБ повинна мати низький термічний опір і запобігати потраплянню води або водяної пари. В більшості СБ для тильної поверхні використовується тонкий полімерний лист. Рамка або каркас є конструктивним компонентом, який слугує окантовкою модуля та зазвичай виготовляється з алюмінію. Конструкція каркаса не повинна мати виступів, які можуть призвести до осідання води, пилу або інших речовин.

За матеріалом і технологією виробництва СЕ можна поділити на такі види:

1) кремнієві:

- монокристалічні;
- полікристалічні;

– аморфні;

2) плівкові:

- на основі телуриду кадмію;

- на основі селеніду міді-індію;

– полімерні.

Монокристаллічні кремнієві СЕ (рис. 1.2) виготовляють із кремнієвих

пластин 0.3 мм (300 мкм) товщини, шляхом їхнього легування відповідно донорнимі і акцепторними домішками, створення омічних контактів (суцільного тильного і решіточного лицьового) і текстурування (спрямованого хімічного травлення поверхні) для додання, антивідбивних властивостей. Процес їх виготовлення технологічно складний і дорогий [15].



Рис. 1.2. Монокристалічні (а), полікристалічні (б), аморфні (в) сонячні елементи

Існують кілька типів конструкції монокристалічних СЕ, що відрізняються способом формування, структурою та розташуванням контактів (рис. 1.3). Основний недолік монокристалічних кремнієвих СЕ - велика витрата порівняно дорогого високочистого кремнію, більша частина якого відіграє роль пасивної підкладки. Слід зазначити, що технологія виробництва СЕ на кристалічному кремнії перебуває в майже ідеальному стані і досить складно знайти шляхи поліпшення вже існуючих технологічних процесів, відпрацьованих у плині багатьох років у рамках виробництва мікроелектронних пристроїв [22].

Альтернативою монокристалічного кремнію є полікристалічний кремній (рис. 1.2). У нього більш низька собівартість. Кристали в ньому ще агрегатні, але мають різну форму і орієнтацію. Цей матеріал, в порівнянні з темними монокристалами, відрізняється яскраво синім кольором. Удосконалення процесу виробництва елементів даного типу дозволяє сьогодні отримувати компоненти, характеристики яких лише трохи поступаються по електричним показниками



монокристалів. ККД таких фотоелектричних модулів набагато нижчий від розглянутих вище і складає 5–12 % (теоретичний поріг – 16 %).

Рис. 1.3. Типи сонячних елементів на основі монокристалічного кремнію: а) простий p-n-перехід; б) метал-ізолятор-n-p-структура (MINP); в) сонячний елемент із пасивуючим емітером (PESC) г) двохлицьовий сонячний елемент; д) структура з однобічним вбудованим контактом (SSBS); е) структура із двостороннім вбудованим контактом (DSBS); ж) структура з пасивуючим емітером і локальнодифузійним тильним контактом (PERL).

СЕ з аморфного кремнію можна віднести як до кремнієвих (матеріал виготовлення – кремній), так і до плівкових, оскільки виготовлені вони за принципом виробництва плівкових батарей (рис. 1.2). При виготовлені СЕ з аморфного кремнію використовуються не кристали кремнію, а так званий силан (кремневодень). Його наносять на підкладку всередині батарей. ККД СЕ з

аморфного кремнію складає 6-8 % [15].

Аморфні СЕ використовують як поглинаючий шар аморфні речовини, що володіють тільки ближньою впорядкованістю структури. Ідеальним аморфним матеріалом для використання як поглинач є аморфний кремній. Значення його забороненої зони може бути змінене шляхом введення домішки водню (гідрогенізації). Аморфний кремній, легований воднем (a-Si:H), є основою аморфних сонячних елементів. Іноді, крім водню, в поглинаючому аморфному шарі використовуються також добавки германія (a-SiGe:H).

В якості робочого переходу для аморфних кремнієвих СЕ можуть використатися бар'єр Шотки, МДП-структура, p-i-n-структура. На рис. 1.4 представлені різні варіанти конструкції сонячних елементів з аморфного кремнію.

Аморфні кремнієві CE з p-i-n-структурою зараз застосовуються у різних областях, завдяки можливості їх виготовлення на металевій фользі, наприклад, з нержавіючої сталі, і полімерних плівках, забезпечених металевим покриттям. Використання таких підкладок сумісно з технологією масового виробництва гнучких CE.

Аморфні кремнієві СЕ відносяться ДО найбільш перспективних енергії найближчого майбутнього. перетворювачів сонячної Основною проблемою, пов'язаної з аморфними кремнієвими СЕ, € їхня сильна деградація при опроміненні сонячним світлом, що обумовлено ефектом Стейблера-Вронского. Даний ефект полягає у виникненні метастабільних дефектів в аморфному кремнії при впливі на нього сонячним світлом, що обумовлено трансформацією електронних станів поблизу валентної зони. Тому при розгляді аморфних кремнієвих СЕ звичайно оперують не початковими, а стабілізованими характеристиками, вимірюваними після витримки СЕ під впливом сонячного випромінювання в плині не менш ніж 1000 годин [8,11,15].

скло	
ITO (+)	
p-a-Si:H	
i-a-Si:H/a-SiC:Н 100нм	
n-a-Si:H p-a-Si:H	
i-a-Si:Н 200нм	
n-a-SiH n-a-SiH	
i-a-Si:H/a-SiGe:H 100нм	
n-a-Si:H	
метал (-)	
a	б
ITO	ZrO <sub>2</sub>
Pd	Pd
14	SiO2
a-Si:H	a-Si:H
n-a-Si:H	n-a-Si:H
метал (Мо)	сталь
В	Г
скло	скло
SeQ.	ITO (+)
5110 <sub>2</sub>	p-a-Si:H
p-a-Si:H	i-a-Si:Н-буфер
a-Si:H	500 нм i-a-Si:Н
n-a-Si:H	
AI/TI-контакт	n-a-Si:H
	метал (-)

Рис. 1.4. Сонячні елементи на основі аморфного кремнію:

a – бар'єр Шоттки; б – МДП (MUS) – структура; в – p-i-n-структура; м – p-i-nструктура з буферним шаром (одноперехідний елемент); д – трехперехідний елемент (3 p-i-n-структури з послідовною сполукою) [1]

У цілому аморфні кремнієві СЕ є досить перспективним матеріалом для сонячних батарей з відносно високим ККД, низкою собівартістю та малою витратою матеріалу за рахунок значно меншої товщини поглинаючого шару, чим в інших сонячних елементах на основі кремнію.

Перевагами СЕ з аморфного кремнію є:

- набагато краще оптичне поглинання (у 20 разів);
- краща робота за відсутності прямого сонячного опромінення;
- еластичність панелей.

СЕ з використанням телуриду кадмію (CdTe) виробляються на підкладці з прозорим провідником, який виготовляється з оксиду індію та олова, і використовується як передній контакт. Ця підкладка покривається шаром селеніду кадмію, має п-провідність. Після цього наноситься шар телуриду кадмію, має р-провідність. У завершенні модуль закривається металевою струмопровідної пластиною.

Кадмій має високий рівень світлопоглинання. Як матеріал для сонячних батарей космічної галузі був відкритий в 70-х роках минулого століття. Незважаючи на низький ККД близько 10 %, вартість одиниці потужності у СБ на основі телуриду кадмію менша, ніж у аналогів [11,69].

У СЕ на основі селеніду міді-індію використовується тонкий шар міді, індія, галію та селену, нанесений на скляну або пластикову підкладку (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Сонячний елемент з селеніду міді, індія, галію (CIGS)

Комбінація міді, індія, галію та селену призводить до найвищої ефективності серед тонкоплівкових типів. СЕ на основі селеніду міді-індію перетворює 15–20 % падаючого на неї сонячного випромінювання в електричну

енергію. Основним недоліком цього виду панелей є велика вартість, що зумовлена використанням міді та індію [22].

Полімерні СЕ створені на основі спеціальної плівки, полімерів і електродів з алюмінію (рис. 1.6).



Рис. 1.6. Плівкові полімерні сонячні елементи

Ціна на полімерні СЕ приблизно в два рази менша, ніж на кристалічні СЕ. Виготовлення полімерних СЕ повністю безпечне для навколишнього середовища – за дослідженнями вчених, викиди від виготовлення таких установок на 3/4 менше, ніж від кремнієвих варіантів. ККД плівкових полімерних СЕ – лише 5–6 %.

Арсенід-галієві (GaAs) СЕ виготовляються на основі сполуки миш'яку з галієм, яка має більш високий теоретичний ККД, ніж кремнієві СЕ. Арсенідгалієві СЕ мають більш високий рівень поглинання сонячного випромінювання та мають значно меншу порівняно з кремнієм товщину.

СЕ товщиною 5–6 мкм дозволяють отримання ККД до 20 %, тоді як товщина кремнієвих СЕ не може бути меншою з 50–100 мкм без помітного зниження їх ККД. Це дозволяє створення легких плівкових СЕ, для виробництва яких потрібно порівняно мало вихідного матеріалу [15,22,57].

Експериментальні залежності ККД від температури арсенід-галієвих СЕ свідчить про те, що підвищення їх температури до 150–180 °С не призводить до

істотного зниження ККД і оптимальної питомої потужності таких СЕ. У той же час для кремнієвих СЕ підвищення температури вище 60–70 °С є майже критичним – їх ККД падає вдвічі. Проте, на відміну від кремнію, галій є дефіцитними матеріаломи, що обмежує можливості виробництва СЕ на основі GaAs в кількостях, необхідних для широкого впровадження.

Основні переваги та недоліки розглянутих СЕ різних типів представлені у табл. 1.1

Таблиця 1.1

Види сонячних елементів	Переваги	Недоліки
Монокристалічні СЕ	<ol> <li>Висока продуктивність – не менше 17-25 %.</li> <li>Мінімальне падіння потужності протягом 25 років експлуатації.</li> <li>Займають меншу площу, ніж полікристалічні, аморфні панелі аналогічної потужності.</li> </ol>	<ol> <li>Висока вартість, тривала окупність.</li> <li>Чугливість до забруднень.</li> <li>Зниження продуктивності при розсіяному світлі.</li> </ol>
Полікристалічні СЕ	<ol> <li>Менша вартість у порівнянні з монокристалічними виробами.</li> <li>Хороші показники продуктивності в умовах розсіяного світла.</li> <li>За 20 років експлуатації зберігають 80-85 % потужності.</li> </ol>	<ol> <li>Середня порівняно з іншими панелями продуктивність – 15-20 %.</li> <li>Займають більше площі, ніж монокристалічні панелі тієї ж потужності.</li> </ol>
Аморфні СЕ	<ol> <li>Можливість виготовлення тонких, гнучких виробів.</li> <li>Надійність і простота конструкції.</li> <li>Висока продуктивність при розсіяному освітленні.</li> <li>Стабільна робота при високих температурах.</li> <li>Менше зниження ефективності при запиленні поверхні.</li> <li>Можливість монтажу на будь-які архітектурні форми.</li> </ol>	<ol> <li>Потреба в великих площах.</li> <li>Висока вартість виробів на гнучкій підкладці.</li> </ol>
Плівкові СЕ	Низька вартість при серійному виробництві	Низькі показники ефективності, проблема утилізації токсичних матеріалів

Переваги та недоліки різних типів сонячних елементів
1.2 Аналіз зовнішніх і внутрішніх факторів, що викликають ушкоджуючі дефекти на сприймаючій поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача

Загалом, очікуваний термін служби СБ становить 25 років. Як показує практика експлуатації в більшості випадків СБ виходять з ладу значно раніше.

В процесі експлуатації СБ постійно знаходяться на відкритому повітрі. Під час роботи СБ піддається впливу факторів навколишнього середовища, таких як: сонячне випромінювання, температура, вологість та фізичні навантаження. Ці фактори мають значний вплив на роботу СБ.

Протягом тривалого часу, під дією факторів навколишнього середовища всередині СБ починають відбуватися процеси деградації - зниження вироблення електроенергії СБ, через фізичні зміни у структурі самої панелі [32,46,56,62]. Деградація СБ може бути як лінійною, так і нелінійною, залежно від механізмів, що лежать в її основі [66,71]. Лінійна деградація відбувається, коли швидкість деградації є постійною з часом, що призводить до поступового зниження продуктивності СБ. Нелінійна деградація відбувається, коли швидкість деградації змінюється з часом, що призводить до прискореного або уповільненого зниження продуктивності СБ [76,78].

Є кілька типів деградації, які виникають протягом тривалої експлуатації СБ:

- деградація, спричинена потенціалом;

- світлоіндукована деградація (фотодеградація);

- деградація через фактори навколишнього середовища.

Деградація, спричинена потенціалом, відбувається під дією різниці потенціалів напруги між системою заземлення і струмоведучих частин модулів, що призводить до струму витоку, який з часом пошкоджує СБ.

Світлоіндукована деградація виникає під впливом ультрафіолетового випромінювання сонця, при цьому відбувається зміна кольору фотоелементів, руйнуються матеріали СБ. УФ-випромінювання сприяє виробленню оцтової кислоти з матеріалу герметика, що призводить до хімічної корозії пальцевих електродів СБ.

Деградація через фактори навколишнього середовища відбувається під впливом: високої температури, снігу, граду, дощу, вітру, вологості, механічних навантажень, повітря з високою концентрацією солей, газів, певного типу бруду та піску.

Висока температура може різко змінити властивості полімерного матеріалу СБ. Коли є тимчасові високі температурні коливання, це може спричинити термомеханічну напругу. Термічна напруга концентрується на межах розділу між шарами, що може призвести до значної поломки модуля та швидкої деградації. Це можна побачити в циклічних випробуваннях, проведених на СБ [56,62,66,71].

Сніг може спричинити великі статичні механічні навантаження, а вітер може спричинити як статичні, так і динамічні навантаження на СБ. Град викликає ударне напруження на поверхні СБ, залежно від його розміру та швидкості, і може мати сильний локальний вплив.

Вологість впливає на продуктивність полімерів, з яких виготовлені частини СБ: активний шар (напівпровідник) і металеві елементи, пальці, сітки та роз'єми. Вологість також впливає на адгезію між полімерними шарами в поєднанні з теплом.

Повітря з високою концентрацією солей може спричинити корозію металевих компонентів і руйнування полімерів, особливо в районах поблизу моря.

Пісок і пил в поєднанні з вітром можуть мати абразивні властивості, через багато сухих і вологих циклів, вони призводять до утворення шару пилових відкладень на СБ.

Пилові відкладення та накопичення залежно від свого розміру та щільності, спричиняють зниження пропускання світла, що призводить до затінення комірок СБ, що, в свою чергу, понижує вихідну потужність СБ до 60-70%, та підвищує робочу температуру модуля.

Гази певного типу можуть, окремо або в поєднанні з вологістю, спричиняти корозію, особливо в районах поблизу промислових підприємств або автомобільних доріг.

Всі три типи деградації призводять до фізичного пошкодження компонентів СБ, що призводить до зменшення ефективність і довговічність СБ протягом терміну їх служби.

Відмови СБ поділяються на такі три категорії: відмови на початку терміну служби, відмови в процесі експлуатації та відмови через знос.

Найбільш поширеними пошкодженнями у польових умовах є відмова розподільної коробки, розбиття скла, дефектне міжелементне з'єднання, незакріплена рама та розшарування. Візуальні дефекти сонячних батарей представлені в таблиці 1.2.

Табл. 1.2

Тип	Зображення дефекту
Вигнуті або зміщені зовнішні поверхні, підкладки, рами та розподільні коробки	
Тріщина в комірці	
Бульбашки або розшарування	
Порушення механічної цілісності,	

Візуальні дефекти СБ

Як видно з таблиці 1.2, найпоширенішим дефектом СБ є наявність мікротрищин в СЕ. СБ складаються з різних шарів, починаючи зі скляного шару з антивідблиском, герметизуючого матеріалу, матриці СЕ, іншого герметизуючого шару та тильного листа. Ця структура не забезпечує належного захисту СЕ, інкапсульованих усередині, тобто СЕ знаходяться під високим ризиком розвитку мікротріщин протягом будь-якої стадії, починаючи від виробництва, транспортування, монтажу, до етапу обслуговування [13,15].

Різні види дефектів СБ виявлених за допомогою візуального огляду у польових умовах представлені в таблиці 1.3.

Табл. 1.3

Різні види дефектів СБ виявлених за допомогою візуального огляду у

#### польових умовах

Тип	Зображення дефекту
Сліди пропала спереду, зміна кольору інкапсулянта, пов'язаного з перегрівом вздовж металевого з'єднання	
Відшарування модуля	
Руйнування захисного скла	K
Зміна кольру комірки на коричневий внаслідок постійного нагрівання під час її роботи	
Комірка з двома тріщинами	
«Сліди равлика», зміна кольору	
пасти, що використовується для ліній сітки на	
комірках. Знебарвлення з'являється вздовж тріщини	
комірки	

Для виявлення дефектів СБ у польових умовах використовується методи синхронної термографії, електролюмінесцентного контролю та багато інших. У табл. 1.4 представлено візуалізація огляду дефектів СЕ за допомогою методу синхронної термографії.

Табл. 1.4

Тип	Зображення дефекту
Крайовий ізолюючий шунт, виникає тільки на краю комірок.	
Комірка шунтується міжсполученням комірок	
Сполучна стрічка зламаної комірки	
Бульбашки середнього розміру в герметизуючий матеріал	
Тріщини комірок	
Локальний омічний шунт	

Візуалізація огляду дефектів СЕ за допомогою синхронної термографії.

У табл. 1.5 представлено візуалізація огляду дефектів СЕ та СБ за допомогою електролюмінесцентного контролю.

## Табл. 1.5

Візуалізація огляду дефектів СЕ та СБ за допомогою електролюмінесцентного контролю

Тип	Зображення дефекту
1	2
Кристалічні дислокації	
Кільця смугастості	

1	2
Тріщини в модулі сонячного елемента.	
Тріщини в модулі сонячного елемента У комірці є тріщина, і тріщина впливає проходження струму до сполучної стрічки комірки.	
Поперечна тріщина	
Тріщини в модулі сонячних елементів. У комірці є тріщина, яка повністю ізолює частину комірки від сполучної стрічки комірки.	
Порушення формування контакту, температурні неоднорідності	
Порушення формування контакту, температурні неоднорідності в процесі випалу комірки	
Несправність шунту на сонячному елементі	
Від'єднане з'єднання комірок	
Індукована деградація (PID).	
Індуковані тріщини комірок, що повторюються	
Тяжке однорідне механічне навантаження. Загальна структура тріщин у модулі виглядає як візерунок Х- тріщин. Зразок Х-тріщин візуалізується на зображенні червоними лініями.	
Тріщини розташовані в основному в комірці у середині модуля	

Як видно з табл. 1.2-1.5 найбільш розповсюдженим видом дефектів СБ є поява мікротріщин. Деякі типи мікротріщин СБ можуть виростати відповідно до їх форми та розташування в СБ. Це зростання може статися через транспортування, неправильне встановлення, поводження, вібрацію, надмірне навантаження, навантаження на навколишнє середовище, неправильне очищення, а також під час експлуатації та етапу обслуговування. Необхідно знайти вплив кожної форми мікротріщини на продуктивність СБ, щоб оптимізувати виробництво електроенергії від СБ та зменшити витрати на експлуатацію та обслуговування.

Тріщини комірки можуть утворюватися в СЕ різної довжини та орієнтації. У процесі виробництва у СБ зазвичай вбудовано 60 СЕ.

Нарізка пластин, виробництво елементів, зв'язування та процес вбудовування під час виробництва СБ, викликають тріщини у СЕ.

Процес монтажу СБ має високий ризик появи тріщин в СЕ. Після завершення виробництва джерелом тріщини у СЕ є упаковка (транспортування), повторне завантаження та встановлення СБ.

Тріщини в СЕ - справжня проблема для СБ, оскільки їх важко уникнути і досі практично неможливо кількісно оцінити їх вплив на ефективність СБ протягом її терміну служби [13,15]. Незначна кількість мікротріщин нової СБ практично не впливає на потужність, поки різні частини комірок все ще електрично пов'язані. Однак, у міру старіння СБ та впливу різних зовнішніх факторів, може призвести до зростання кількості мікротріщин, що в призведе до значного зниження потужності СБ.

Для аналізу тріщин у СБ вводиться класи структури тріщин, які сортують СЕ по орієнтації тріщини (рис. 1.7).

Проаналізуємо внутрішні фактори, внаслідок яких виникають різні дефекти у вигляді макро- і мікротріщин у структурі поверхні напівпровідникового шару ФЕП, які впливають на параметри при роботі СБ [58,59].

Поверхневі дефекти, що мають макро- і мікро розміри на поверхні СЕ,

практично візуально не розпізнавані, часто призводять до виникнення серйозних проблем. Причини появи мікротріщин на поверхні СЕ можуть різнитися. Руйнування СЕ є розповсюдженою проблемою, з якої зіштовхуються як виробники СБ, так і ті, хто їх експлуатує.



Рис. 1.7. Види тріщин у сонячних елементах:

- а) дендритова тріщина;
- б) тріщини у різних напрямках;
- в) тріщини під кутом 45;
- г) тріщини паралельно шині;
- д) тріщини перпендикулярно шині

Мікротріщини на СЕ можуть з'явитися на різних етапах: під час виробництва, транспортування, монтажу та коли СБ піддається впливу атмосферного середовища [35,37]. Різне середовище експлуатації та природні фактори (механічні й хімічні), що впливають на роботу СБ такі, як сніг, град, сильний холод, вітер і сонце, можуть викликати мікротріщини на СЕ [35,37]. Інші фактори можуть бути пов'язані з тепловим циклом СЕ, що містить у собі розширення, тиск, розтягання металевих контактів та інше [43,44]. Передові технології виробництва, застосовувані окремими виробниками, на даний момент дуже добре показали себе в запобіганні мікротріщин на СЕ, викликаних факторами навколишнього середовища. Однак уникнути мікротріщин у довгостроковій перспективі практично неможливо, їх потенційні побічні ефекти можуть призвести до серйозної проблеми, при експлуатації СБ в різних режимах роботи [45,49,]. Результати впливу ушкоджуючих дефектів на структуру НПШ ФЕП, проявляються в зменшення ефективності СБ [67,84,88]. Такі результати відбуваються через механічний вплив або теплову напругу. У процесі виробництва мікротріщини виникають, в основному, при ламінуванні СБ, особливо коли використовуються певні плівки типу EVA зі слабкої вологопроникливістю. У таких випадках волога проходить через мікротріщини на передній частині ламіната, а потім відбувається окислення контактних пальців.

Мікротріщини на поверхні СЕ призводять до підвищення опору елемента, тому що струм, протікає по шляху найменшого опору [36,48,50,52]. Зламані СЕ гарантують, що електрони змушені використати альтернативні (перевантажені) шляхи. Наявність мікротріщин на поверхні СЕ, призведуть до зменшення строків експлуатації СБ та впливають на розрахунки окупності інвестицій, загальну продуктивність і можливість передчасної заміни масивів. Заміна ушкоджених одиничних СЕ часто не підходить, через зміни електричних характеристик із часом [60,61,65,68].

Таким чином, вищенаведений аналіз основних причин появи ушкоджуючих дефектів на поверхні СЕ, показав, що це приводить до змін геометричної площі сприймаючої поверхні і впливає на величини заздалегідь встановлених заводських параметрів. Крім того, допущення про гладку активну сприймаючу поверхню СЕ, вносять значну погрішність при розрахунку вихідних параметрів, що вплине на точність побудови ВАХ і визначення величини ККД СЕ. [50,52,65]. 1.3 Аналіз існуючих підходів для моделювання якісних характеристик сонячного елемента

Як відомо [8,11], фотоефект проявляється у фотоелектричній системі, що прямо перетворить сонячну енергію в електричну енергію.

Найпростіша конструкція ФЕП - приладу для перетворення енергії сонячного випромінювання, на основі монокристалічного кремнію (рис. 1.8).



Рис. 1.8. Фотоелектричний перетворювач

На рис. 1.8 видно, що з однієї сторони (лицьова) від p-n-переходу перебуває n-шар з тонким металевим контактом, а з іншої сторони (тильна) pшар, на який нанесений суцільний металевий контакт. При освітленні ФЕП потік електронів, що падає, генерує нерівноважні електронно-діркові пари. Електрони, що генеруються в p-шарі підходять до p-n-переходу та виносяться існуючим в ньому електричним полем в n-шар. Теж відбувається з дірками утвореними в n-шарі, вони переносяться в p-шар [14,16,17].

Внаслідок чого п-шар здобуває додатковий негативний заряд, а р-шар позитивний, тому знижується первісна контактна різниця потенціалів між р- і n-шаром напівпровідника [22]. Це спричиняє появу постійної напруги в зовнішнбому електричному колі, при цьому n-шар відповідає негативному полюсу, а р-шар позитивному.

Якщо до p-n-переходу підключити змінний опір навантаження (рис. 1.8), то напрямок струму в ньому завжди збігається з напрямком фотоструму, а сам струм навантаження дорівнює результуючому струму через p-n-перехід. Це дає можливість одержати рівняння повного струму (для одиниці площі ФЕП).

Як відомо [11,18], побудова моделей ФЕП заснована на обліку параметрів: вихідних (струм навантаження, вихідна потужність, напруга); зовнішніх (освітленість, температура, кут падіння світла), внутрішніх (напруга холостого ходу та струм короткого замикання). Для розробки моделі ФЕП, що дозволяє оцінити вплив на вихідні характеристики ФЕП, як внутрішніх  $U_{oc}$ ,  $I_{sc}$ так і зовнішніх факторів (W, T,  $\alpha$ ), застосовують еквівалентну електричну схему заміщення ФЕП (рис. 1.9).



Рис. 1.9. Еквівалентна електрична схема заміщення фотоелектричного перетворювача

За законом Кірхгофа, співвідношення струмів у ланцюзі еквівалентної електричної схеми заміщення (рис. 1.9), буде визначатися згідно виразу (1.1):

$$I_N = I_F - I_D - I_{R_s}, (1.1)$$

де  $I_N$  – струм у ланцюзі, А;

 $I_F$  – фотострум, А;

*I*<sub>D</sub> – струм що протікає, через ідеалізований р-п перехід, А;

 $I_{Rs}$  – струм через шунтовий опір  $R_s$ , А.

Необхідно відзначити, що тому що фотострум  $I_F$ , прямо пропорційний освітленості E і збільшується з ростом температури T ФЕП, то його часто, згідно [21,23], визначають виразом (1.2):

$$I_{F} = \frac{E}{E_{0}} \Big[ I_{sc} + k_{I_{sc}} \left( T - T_{0} \right) \Big], \qquad (1.2)$$

де E – енергетична освітленість,  $BT/M^2$ ;

 $E_0 = 1000 \frac{Bm}{M^2}$  – енергетична освітленість при стандартних умовах;

*І*<sub>sc</sub> – струм короткого замикання, А;

*k*<sub>Isc</sub> – температурний коефіцієнт струму короткого замикання;

*Т* – абсолютна температура НПШ ФЕП.

З виразу (1.2) видно, що введене допущення, про ідеальну гладку поверхню, не дозволяє враховувати вплив загальної геометричної площі на вихідні параметри ФЕП, а, отже, вносить значні погрішності при побудові ВАХ.

У роботі [75] розглянуте завдання підвищення ефективності перетворення енергії сонячного випромінювання в електроенергію СЕ. Показано, що ефективність фотоелектричного перетворення, визначається світловою ВАХ СЕ, форма якої, залежить від ряду параметрів: послідовного й паралельного (шунтуючого) опорів, щільності струму насичення діода, діодного коефіцієнта та деяких інших. Відзначається, важливість завдання контролю та оптимізації цих параметрів при виробництві СЕ, що вимагає створення системи контролю характеристик СЕ й удосконалювання способів визначення їхніх параметрів. Тому в роботі [75] розглянута модель СЕ, що враховує співвідношення між такими параметрами як: номінальна та максимальна потужність; напруга холостого ходу та номінальна напруга; струм короткого замикання та номінальний струм. Розглянута модель дозволяє розрахувати вихідну потужність і ККД СЕ. Однак, у запропонованих аналітичних виразах моделі вводяться обмеження і допущення про ідеально гладкі поверхні, тобто без поверхневих дефектів, що може викликати погрішності й відхилення при розрахунку реальних вихідних параметрів СЕ. Таким чином, перевагою пропонованого способу є використання єдиної ВАХ і однозначність визначення параметрів СЕ, а його недоліком - низька точність визначення параметрів СЕ при малих значеннях паралельного опору.

У роботі [82] запропонована модель СЕ для різних режимів роботи, з урахуванням впливу тільки зовнішніх факторів. У моделі запропоновані аналітичні співвідношення між вихідними параметрами СЕ (струмом навантаження, вихідною напругою) і зовнішніми умовами: інтенсивністю сонячного випромінювання, температури й енергетичною освітленістю. Як недолік даної моделі, необхідно відзначити, що такі модельні параметри як: зворотний струм насичення, послідовний і паралельний шунтовий опір, розраховувалися тільки на основі паспортних даних сонячного елемента. При цьому, реальні дані, які істотно залежать від стану поверхневого рельєфу НПШ ФЕП, у моделі розглядалися з різними допущеннями та обмеженнями.

У роботі [81], наведені результати експериментальних досліджень вихідних параметрів СЕ: напруги холостого ходу, струму короткого замикання, вихідної потужності з урахуванням освітленості та температури в різних кліматичних і температурних умовах. Крім цього, виконані оцінки температурних коефіцієнтів напруги холостого ходу (НХХ) і струму короткого замикання (СКЗ). Експериментально підтверджено, що ТКЗ прямо залежить від освітленості, а НХХ змінюється несуттєво через логарифмічний характер залежності від параметра фотоструму. Як недолік, необхідно відзначити, що в роботі показано, що температурні коефіцієнти НХХ і СКЗ для сонячної станції істотно більше, ніж для сонячного монокристалічного елемента. Однак, не досліджені причини такої розбіжності і його впливу на величину вихідної потужності.

У роботі [80], показано, що на вихідну потужність СБ впливають різні фактори, такі як часткове затінення, сонячна інсоляція, температура й конфігурація фотоелектричних масивів. Ці фактори викликають зниження ефективності та надійності вироблення електроенергії у СБ. Проведено дослідження впливу неоднорідного часткового затінення на характеристики СБ. При цих умовах фотоелектричні ВАХ СЕ стають більше складними, з більш ніж одним піком. Тому, дуже важливо, при цих умовах, розрахувати максимально можливу потужність. Для цього в роботі використовується моделювання характеристик СЕ системах схемотехнічного моделювання МАТLAB/Simulink. Як недолік, у роботі показано, що в умовах часткового затінення зменшуються струм навантаження й теплові втрати, однак не досліджені причини такого зниження від стану поверхні ФЕП.

У роботі [82], були проведені дослідження ефективності роботи СБ у польових умовах, і встановлено, що електрична потужність стаціонарно встановленої СБ залежить від наступних зовнішніх факторів:

– зміни кута падіння сонячних променів, обумовленого добовим і сезонним переміщенням Сонця по небозводу для даної широти місцевості;

 – зміни інтенсивності сонячного випромінювання залежно від прозорості атмосфери й хмарності;

– добових і сезонних змін температури навколишнього повітря;

– розігріву СБ при зростанні світлового потоку.

Виявлено, що при певній освітленості відбір максимальної потужності ( $P_{max}=U_{max} I_{max}$ ) від СБ має місце тільки в тому випадку, якщо опір зовнішнього навантаження задовольняє співвідношенню:  $R_{Vn}=U_{max}/I_{max}$ . Показано, що при постійному навантаженні, зміна освітленості робочої поверхні СЕ приводить до неузгодженості СБ із зовнішнім навантаженням, і відбір потужності буде нижче максимально можливих значень. Недоліком є, те що для СЕ з монокристалічного кремнію, зв'язок між максимальною потужністю та НХХ  $U_{oc}$ , СКЗ  $I_{sc}$ , була встановлена тільки експериментально і склала приблизно (0,70...0...0,75) від значення добутку ( $U_{oc} \cdot I_{sc}$ ). Також показано, що значення  $U_{max}$  і  $I_{max}$  приблизно пов'язані з  $U_{oc}$  і  $I_{sc}$ :  $U_{max} \approx 0,85$   $U_{oc}$ ,  $I_{max} \approx 0,85$   $I_{sc}$ . Звідки отримане неточне приблизне значення опору навантаження, на якому розсіюється максимальна електрична потужність при даній освітленості, і становить:  $R_{Vn} \approx 0,85$   $U_{oc} / 0,85$   $I_{sc} \approx U_{oc} / I_{sc}$ .

Такий підхід до розрахунку параметрів CE, приводить до неточності ВАХ і не дозволяє визначити реальний ККД CE.

У роботі [83], отримана імітаційна модель, що дозволяє відображати сімейство ВАХ і ВВХ сонячних модулів залежно від рівня інтенсивності сонячного випромінювання, температури, значень СКЗ, НХХ, внутрішніх опорів СЕ, діодного параметра. Розбіжність даних результатів моделювання з технічними заводськими характеристиками не перевищує 7 %. Як недолік необхідно відзначити, що розроблена модель, описує реальний сонячний модуль, лише з деяким ступенем наближення, з урахуванням прийнятих допущень. Спостерігаються відхилення отриманих при моделюванні вольт-амперних характеристик від експериментальних. При моделюванні приймалися наступні допущення: ВАХ і ВВХ моделювалися без обліку часткового затінення сприймаючої поверхні ФЕП і без можливого її ушкодження. Дані допущення дають можливість застосовувати тільки класичні аналітичні вирази для моделювання характеристик СЕ. Основною причиною відхилень ВАХ і ВВХ є труднощі точного виміру як послідовного і шунтуючого опорів, так і активної площі СЕ.

Аналіз наукових публікацій [1-3,14,16,17,18,21,23] показав, що процеси моделювання в моделях СЕ проводилося з обмеженнями і допущеннями щодо сприймаючої поверхні, які істотно впливають на точність, нелінійність і нестабільність ВАХ і ВВХ. Отже, даний підхід вносить істотні погрішності в розрахунках електрофізичних величин СЕ та не дає можливості застосовувати, повною мірою, аналітичні класичні вирази для моделювання характеристик СЕ

[6,7,10,13]. Крім того, необхідно відзначити, що точність моделювання ВАХ і ВВХ, залежить від можливих технологічних розкидів для кожного СЕ. Тому виявлення відповідності характеристик СЕ, представлених виробником і реальними характеристиками СЕ при його експлуатації, з обліком різних зовнішніх і внутрішніх факторів впливу на сприймаючу поверхню ФЕП, є актуальним завданням [42,53].

У роботі, для дослідження впливу властивостей реальної сприймаючої поверхні ФЕП на вихідні параметри СЕ, було запропоновано використати вираз (1.3) для визначення фотоструму ( $I_F$ ), з обліком загальної геометричної площі ( $S_{\Sigma}$ ) поверхневого НПШ ФЕП:

$$I_F = \frac{F_o \cdot e}{h \cdot v} \cdot (1 - R) \cdot \eta \cdot K_c \cdot S_{\Sigma}, \qquad (1.3)$$

де F<sub>0</sub> – вхідний світловий потік;

е – заряд електрона;

*h* – постійна Планка;

*v* –частота падаючого світлового потоку;

- *R* коефіцієнт відбиття світлового потоку від фронтальної поверхні;
- $\eta$  коефіцієнт відбитого світлового потоку фронтальної поверхні;
- *K*<sub>c</sub> інтегральний коефіцієнт збирання носіїв;
- $S_{\Sigma}$  загальна геометрична площа сприймаючої поверхні НПШ ФЕП.

Тому що паралельно джерелу струму включений p-n-перехід, то струм минаючий через діод *I*<sub>D</sub>, відповідає виразу (1.4):

$$I_{D} = I_{rsc} \left[ \exp\left(\frac{U}{\varphi_{T}}\right) - 1 \right] = I_{ON} \left[ \exp\left(\frac{e \cdot U}{k \cdot T}\right) - 1 \right], \tag{1.4}$$

де *I*<sub>rsc</sub> – зворотний струм насичення діода;

*U*<sub>V</sub> – вихідна напруга;

$$\varphi = \frac{k \cdot T}{e}$$
 – тепловий потенціал;  
 $k$  – постійна Больцмана;  
 $T$  – абсолютна температура;  
 $e$  – заряд електрона.

Тоді, з урахуванням виразів (1.3) і (1.4), вираз (1.1), можна записати як аналітичні вирази (1.5) і (1.6) моделі СЕ, що зв'язують струм навантаження  $I_N$  і вихідну напругу  $U_N$ , із загальною площею  $S_{\Sigma}$  сприймаючої поверхні:

$$I_{N} = \frac{F_{o} \cdot e}{h \cdot v} \cdot (1 - R) \cdot \eta \cdot K_{c} \cdot S_{\Sigma} - I_{ON} \left[ \exp\left(\frac{e \cdot \left(U_{V} + I_{N} \cdot R_{p}\right)}{A \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{U_{V} + I_{N}}{R_{S}}, \quad (1.5)$$

$$U_{N} = \left(\frac{kT}{e}\right) \cdot \ln\left(\frac{\left[\frac{F_{o} \cdot e}{h \cdot v} \cdot (1 - R) \cdot \eta \cdot K_{c} \cdot S_{\Sigma} \cdot\right] - I_{N}}{I_{0}} + 1\right),$$
(1.6)

де F<sub>0</sub> – вхідний світловий потік;

е – заряд електрона;

*h* – постійна Планка;

*v* –частота падаючого світлового потоку;

*R* – коефіцієнт відбиття світлового потоку від фронтальної поверхні;

*η* – коефіцієнт відбитого світлового потоку фронтальної поверхні;

Кс – інтегральний коефіцієнт збирання носіїв;

 $S_{\Sigma}$  – загальна геометрична площа сприймаючої поверхні НПШ ФЕП;

А – діодний коефіцієнт (залежно від струму, що протікає, через коефіцієнт
 А може мінятися від 1 до 2 (дифузійний або рекомбінаційний струми відповідно);

 $R_p$  – послідовний опір;

*R*<sub>*S*</sub> – шунтовий опір.

Відповідно до виразів (1.5) і (1.6), на рис. 1.10 (а) представлена ВАХ СЕ, що є найважливішою характеристикою, оскільки визначає ККД СЕ, як ефективності перетворення енергії сонячного випромінювання в електроенергію.

ККД СЕ визначається як відношення потужності, вироблюваної СЕ, до потужності падаючого сонячного випромінювання.



Рис. 1.10. Вольт-амперна характеристика фотоелектричного перетворювача

У роботі запропоновано, згідно [75,80,81,82], визначати ККД СЕ виразом (1.7):

$$\eta_{KPD} = \frac{P_{\max}}{P_p} = \frac{I_{sc} \cdot U_{oc} \cdot F_Z}{P_p} = \frac{I_m \cdot U_m}{P_p}, \qquad (1.7)$$

де *I<sub>m</sub>* і *U<sub>m</sub>* – величина струму та напруги, що відповідають точці найбільшої потужності *P<sub>max</sub>*, як показано на рис. 1.10 (б).

 $P_{\max} = U_{oc} \cdot I_{sc} \cdot F_Z$  – максимальна вихідна потужність CE;

 $P_p$  – потужність випромінювання, що падає на СЕ;

 $U_{oc}$  – напруга холостого ходу;

$$F_{Z} = \frac{I_{m} \cdot U_{m}}{I_{sc} \cdot U_{oc}}$$
 – коефіцієнт заповнення ВАХ СЕ.

ККД СЕ залежить від форми його ВАХ згідно виразу (1.7), параметри СЕ, що входять у рівняння ВАХ (1.5) і (1.6), визначають ефективність СЕ. Побудова ВАХ, відповідно до рівняння (1.5) і (1.6), при різних значеннях параметрів СЕ демонструє, що форма ВАХ, істотно залежить від параметрів, точні значення яких необхідні для прогнозування роботи ФЕП. Тому, при розробці та виробництві СЕ, потрібне використання методу достовірного визначення їхніх параметрів, залежно від активної сприймаючої поверхні рельєфу НПШ ФЕП.

Розглянемо вплив внутрішніх параметрів *U*<sub>oc</sub> і *I*<sub>sc</sub>, на побудову моделі СЕ [42,53,75].

<u>Напруга холостого ходу</u>  $U_{oc}$  – це максимальна напруга, створювана сонячним елементом, що виникає при нульовому струмі (рис. 1.10). Воно дорівнює прямому зсуву, що відповідає зміні напруги p-n-переходу з появою світлового струму. Напруга холостого ходу СЕ мало змінюється при різній освітленості та визначається згідно виразу (1.8):

$$U_{oc} = \varphi_T \cdot \ln\left(\frac{I_F}{I_0} + 1\right) = \frac{kT}{e} \cdot \ln\left(\frac{I_F}{I_0} + 1\right)$$
(1.8)

або з врахуванням (1.3), рівняння (1.8) прийме вид відповідно виразу (1.9) для розрахунку напруги холостого ходу  $U_{oc}$ , з врахуванням загальної геометричної площі  $S_{\Sigma}$ :

$$U_{oc} = \frac{kT}{e} \cdot \ln\left(\frac{\frac{F_o \cdot e}{h \cdot v} \cdot (1 - R) \cdot \eta \cdot K_c \cdot S_{\Sigma FEP}}{I_0} + 1\right).$$
(1.9)

<u>Струм короткого замикання</u>  $I_{sc}$  – це струм, що протікає через СЕ, коли напруга дорівнює нулю (тобто коли СЕ замкнути накоротко) (рис. 1.10). Він виникає в результаті генерації та поділу згенерованих світлом носіїв. В ідеальному СЕ за умови помірних резистивних втрат він дорівнює світловому струму. Тому струм короткого замикання можна вважати максимальним струмом, що здатний створити СЕ. Крім того, він прямо пропорційно залежить від інтенсивності світла і може при  $I_{sc} = I_F$ , як показано в роботах [26,31,40], визначатися виразом (1.10):

$$I_{sc} = \frac{F_o \cdot e}{h \cdot v} \cdot (1 - R) \cdot \eta \cdot K_c \cdot S_{\Sigma}.$$
(1.10)

Струм короткого замикання  $I_{sc}$  і напруга холостого ходу  $U_{oc}$  – це максимальні струм і напруга, які можна одержати від СЕ, однак при  $I_{sc}$  і  $U_{oc}$  потужність СЕ дорівнює 0.

<u>Коефіцієнт заповнення</u>  $F_z$  – параметр, що у сполученні із НХХ і СКЗ визначає максимальну потужність СЕ. Графічно коефіцієнт заповнення являє собою міру квадратичності СЕ та дорівнює максимальній площі прямокутника, який можна вписати у вольт-амперну криву (рис. 16а). Коефіцієнт заповнення ВАХ є одним з основних параметрів, по якому можна судити про якість фотоелектричного перетворювача. Типові якісні серійно сонячні елементи, що випускаються, мають коефіцієнт заповнення ВАХ більше 0,7, тобто чим більше коефіцієнт заповнення ВАХ, тим менше втрати в елементі через внутрішній опір.

На графіку рис. 10 (б), показані криві, які мають однакові значення струму короткого замикання та напруги холостого ходу, однак СЕ з меншим коефіцієнтом заповнення ВАХ (нижній графік) виробляє менше потужності в точці максимальної потужності (ТМП).

Для визначення залежності ККД СЕ від загальної площі сприймаючої поверхні НПШ ФЕП у роботі, згідно [33-39], був запропонований вираз (1.11):

$$\eta_{KPD} = \frac{I_{sc} \cdot U_{oc} \cdot F_Z}{E_c \cdot S_{\Sigma}}, \qquad (1.11)$$

де *I*<sub>sc</sub> – струм короткого замикання;

 $U_{oc}$  – напруга холостого ходу;

$$E_{c} = 1000 \frac{Bm}{M^{2}} -$$
щільність потоку сонячного випромінювання;

*S*<sub>∑</sub> – загальна площа поверхні ФЕП.

3 отриманих аналітичних виразів (1.2) - (1.11) моделі СЕ, можна зробити наступні висновки:

– показана залежність величини струму тільки від зовнішніх факторів впливу на поверхню ФЕП, тобто інтенсивності та щільності випромінювання;

 – аналітичні залежності, побудовані з урахуванням тільки геометричної топологічної площі поверхні, без кількісної і якісної оцінки реальної поверхні, що не дозволяє побудувати ВАХ СЕ з точністю, достатньої для інженерних розрахунків;

 – у даній моделі, не враховуються впливи різних умов, на вихідні характеристики СЕ при зміні стану поверхні.

Таким чином, аналіз аналітичних виразів (1.2) - (1.11) моделі СЕ показує, що необхідно враховувати зміну величини геометричної площі поверхні, що

може істотно впливати, при розрахунку вихідних параметрів СЕ. Крім того, аналіз даної моделі показує, що при застосуванні її для моделювання й аналізу СЕ, вноситься цілий ряд обмежень і допущень. Це приведе до значних, а часом небажаних відхиленнях від ВАХ реального СЕ, що спотворює реальні показники величини вихідної потужності й ККД СЕ.

Одна із причин таких відхилень ВАХ це певні складності в оцінці якості рельєфу поверхні ФЕП і, особливо, впливу дефектів, що ушкоджують, на внутрішню структуру поверхневої плівки ФЕП. Аналіз виразів (1.2) - (1.11) показує, що необхідно враховувати зміну величини геометричної площі сприймаючої поверхні НПШ ФЕП при впливі на неї дефектів, що ушкоджують.

Тому, у роботі, обґрунтована необхідність включення в основні аналітичні вирази (1.2) - (1.11) такого додаткового параметра, як величина реальної площі сприймаючої поверхні, що запропоновано розрахувати, з використання апарата фрактальної геометрії.

# 1.4 Аналіз використання методів кваліметрії для оцінювання якості параметрів структури поверхні сонячного елемента

Розгляд і аналіз основних вимог до СЕ показав, що до них відносяться:

- наявність базового шару з більшим показником поглинання оптичного випромінювання;

- відповідний широкозонний шар, призначений для утворення гетеропереходу;

- електричне сполучення шарів, що повинне забезпечувати ефективний збір зарядів;

- надійні омічні контакти.

При виготовленні СЕ важливо оцінити якість кожного з його шарів на етапі нанесення для того, щоб реально представляти їхню кристалічну структуру, хімічний склад, оптичні та електричні властивості [24,77,79].

Для оцінки якості виготовлення СЕ, можливе застосування цілого ряду

оптичних, електричних, рентгенівських і ін. досліджень. Деякі з них використаються для оцінки технологічних процесів при виготовленні СЕ [4,9,12,64,].

Очевидно, що жоден метод діагностики не здатний відобразити всю різноманітність інформації щодо параметрів тонкоплівкових СЕ.

Розглянемо основні методи дослідження та вивчення фізичних властивостей тонких плівок для CE.

Застосування описаних методів сприяє розробці надійних, ефективних і дешевих СЕ.

<u>Метод сканувальної зондовой мікроскопії</u> (SPM). SPM [12] - загальна назва групи методів, у яких використовується зонд для дослідження поверхні та електрофізичних параметрів СЕ. Вид взаємодії між зондом і матеріалом визначає тип SPM. Розрізнення цих методів досягає ~Å і залежить від геометрії вістря зонда та характеру поверхні.

<u>Сканувальна тунельна мікроскопія</u> (STM) [64]. Принцип дії STM заснований на фіксації величини струму, що протікає в зазорі вістря зонда поверхні зразка. За рахунок різниці електричних потенціалів, прикладених до поверхні зразка та до зонду, встановлюється тунельний струм, що експоненційно залежить від відстані вістря зонду - поверхні зразка. В якості зондів для STM звичайно використовується заточений металевий дріт. Зображення поверхні формується або поперечним скануванням і виміром струму (картина струму), або використанням петлі зворотного зв'язку, що підтримує струм постійним, за рахунок пересування зонда ближче або далі від поверхні (топографічне зображення). Висока чутливість тунельного струму до невеликих варіацій відстані дозволяє отримувати зображення з розрізненням порядку розміру атома. Аналізуватися можуть тільки метали та напівпровідники, оскільки необхідно наявність струму між зондом і зразком.

<u>Сканувальна тунельна спектроскопія</u> (STS). Дозволяє одержувати інформацію про електронну структуру поверхні. Вивчення залежності тунельного струму від прикладеної напруги називається *I-V* і *d/dV-V* 

характеристики – приклад STS.

<u>Атомна силова мікроскопія</u> (AFM) [12]. Для одержання зображення фіксується сила взаємодії між вістрям зонда та досліджуваною поверхнею. Радіус закруглення зонда становить порядку 10 нм і відповідає за розрізнення AFM методів. Існують три основних режими AFM: контактний, безконтактний і напівконтактний (режим «обстукування»). Під час сканування в контактному режимі вістря зонда сковзає (аналогічно профілометру) по поверхні. При контактному режимі зонд торкається поверхні. Взаємодія між зондом і зразком відштовхуюче та регулюється керуючою програмою. При безконтактному режимі зонд перебуває в декількох Å над поверхнею, взаємодія є притягуюча. У напівконтактному режимі зонд коливається з певною частотою, «обстукує» поверхню. Калібрування проводиться на стандартних зразках з відомою топографією.

Хоча STM метод більше чутливий за рахунок квадратичної залежності величини струму, що протікає, від відстані вістря-зразка, за допомогою AFM можна аналізувати майже всі типи матеріалів, включаючи діелектрики, органічні й біологічні об'єкти. В AFM режимі зображення звичайно легше одержати, чим в STM.

Експериментальні дані при стандартному AFM і STM аналізі являють собою матрицю даних про вертикальне положення *z* зонда в масиві позицій (*x*, *y*). Графічне подання цих даних (топографія зразка) схоже на зображення сканувальної електронної мікроскопії (SEM).

Перевага SPM полягає в цифровому форматі даних, що дозволяє одержувати тривимірні зображення та робити кількісні виміри, фіксуючи латеральні і вертикальні розміри структури, визначати шорсткість, що є важливими характеристиками тонких плівок, які використовуються у фотовольтаїці.

Похибка AFM і STM методів залежить від кривизни зонда та кривизни досліджуваної поверхні. Для мінімізації похибки зонд повинен мати невеликий кут розхилу конуса і радіуса закруглення вістря. Промислові зонди мають радіуси кривизни від 2 до 200 нм залежно від SPM режиму.

В останні роки розроблено понад сорок методик, заснованих здебільшого на AFM, що дозволяють досліджувати різні параметри й властивості нанорозмірних структур. Зокрема, методика латеральних сил у контактному режимі, дозволяє розрізняти елементи в композитному матеріалі із гладкою поверхнею. Це відбувається за рахунок реєстрації зміни величини скручування консолі для різних матеріалів через різні поверхневі властивості досліджуваних структур. Ділянки, де тертя зонд-зразок більше, дають більший поворот зонда і більш високий контраст зображення. Твердість визначається вдавленням зонда в поверхню. В електростатичній силовій мікроскопії [64] використовується різниця потенціалів між зондом і зразком для вивчення електричних властивостей поверхні зразка. Використовуючи зворотний зв'язок по струму для керування напругою, проводять кількісні виміри потенціалу поверхні. Такий метод називається силовою мікроскопією з використанням зонда Кельвіна (КРFМ).

<u>Сканувальна ємнісна мікроскопія</u> (SCM) [12,64] заснована на вимірі ємності між зондом і поверхнею. За допомогою цього методу можна проводити кількісні виміри концентрації носіїв заряду [55]. У всіх вищевказаних режимах на результати експерименту впливає топографія зразка.

Рентгенівські методи дослідження. Дифракція рентгенівських променів на кристалі речовини є основним методом визначення його кристалічної структури та фазового складу. Сутність методу заснована на дифракції рентгенівських променів на об'єктах, розміри яких порівнянні з довжиною хвилі падаючого випромінювання. Теорія дифракції рентгенівських променів ґрунтується на рівнянні Брега, що описує умову посилення рентгенівських променів, розсіяних на атомних площинах кристала, у результаті їх інтерференції [4,12]. Величина дифракційного максимуму, задається кутом падіння та довжиною хвилі рентгенівського випромінювання. В якості джерела рентгенівського випромінювання звичайно використовують стандартні рентгенівські трубки.

<u>Метод електронного мікроаналізу</u>. Реєстрація характеристичного

рентгенівського випромінювання, збудженого швидкими електронами, лежить в основі електронного мікроаналізу матеріалів [12], використовуваного для якісного та кількісного аналізу елементного складу поверхні СЕ.

Збуджений електронами приповерхневий об'єм має розміри порядку мікрона. Електронним пучком можна сканувати по поверхні, отримуючи розподіл елементів. Метод включає використання первинного рентгенівського випромінювання або електронного пучка, який падає на зразок та вибиває електрони внутрішніх оболонок атомів, створюючи вакансії, які можуть бути заповнені із зовнішніх оболонок. Це формує певний спектр рентгенівського випромінювання для кожного з хімічних елементів зразка. Рентгенівське випромінювання, що створюється заповненням електронами вакансій з Коболонки, називають К-випромінюванням, з L-оболонки - L-випромінюванням. Таким чином, рентгенівські дослідження з використанням стандартних вимірювальних установок і методик [64], дозволяють визначити кристалічну структуру, фазовий склад і товщину досліджуваних плівок СЕ.

<u>Метод сканувальної електронної мікроскопії</u> (SEM). SEM дозволяє досліджувати морфологію поверхні синтезованих плівок CE, розміри зерен і, при скануванні поперечного відколу, мікроструктуру різних шарів CE [12,64].

Для проведення SEM електронною гарматою емітується та прискорюється електронний промінь, фокусовуваний рядом збиральних електромагнітних лінз. При взаємодії променю з поверхнею зразка генеруються вторинні електрони, які поглинаються в сцинтиляторі з випромінюванням фотонів. Фотони, що реєструються, формують зображення.

Для проведення SEM-вимірів використовуються сканувальні електронні мікроскопи, які дозволяють одержати мікрофотографії з розрізненням до сотих часток мікрона (рис. 1.11).



Рис. 1.11. SEM-зображення структури поверхні СЕ

<u>Метод спектроскопічної еліпсометрії</u>. Розглянемо застосування видимого світла для вивчення тонких плівок СЕ.

За допомогою інтерферометрії та рефлектометрії вимірюються малі товщини прозорих тіл по їх кольорам [12]. Метод виміру товщини тонких плівок із застосуванням поляризованого світла (дві взаємно перпендикулярні р- і sполяризації), відомий як еліпсометрія. Метод еліпсометрії використовується для виміру комплексного відношення відбиття р- і s-поляризованих променів. У цьому полягає головна відмінність від рефлектометрії, у якій вимірюється відношення інтенсивності відбитого променя до інтенсивності падаючого променя (рис. 1.12).



Рис. 1.12. Типова еліпсометрична конфігурація, застосовувана для аналізу багатошарових тонкоплівкових структур

Цей принцип закладений у фундаментальному рівнянні еліпсометрії. Винайдення фотомножних трубок, лазерів, волоконної оптики й швидкодіючих комп'ютерів значно поліпшило повторюваність, гнучкість і швидкість еліпсометричних досліджень. Метод еліпсометрії дозволяє створювати велике різноманіття конфігурацій досліду, що підходять для різного застосування. Методи еліпсометрії з фіксованою довжиною хвилі широко застосовуються в мікроелектронній промисловості.

Метод еліпсометрії використовується для виміру комплексного відношення відбиття p- і s-поляризованих променів. У цьому полягає головна відмінність від рефлектометрії, у якій вимірюється відношення інтенсивності відбитого променя до інтенсивності падаючого променя.

<u>Метод сканувальної лазерної мікроскопії (LBIC).</u> Якість CE істотно залежить від просторової однорідності матеріалу шарів. Наявність неоднорідностей (складу твердого розчину, концентрації носіїв, щільності дефектів і т.д.) приводить до розкиду характеристик і низькому виходу придатних CE. Тому просторово-розв'язні методики виміру параметрів напівпровідників необхідні для створення високоефективних CE.

Робота сканувального лазерного мікроскопа заснована на появі фото ЕРС при локальному засвіченню просторово-неоднорідного шару напівпровідника [12].

Якщо енергія фотонів перевищує E<sub>g</sub> напівпровідника, у плямі засвічення відбувається генерація електронно-діркових пар. Нерівноважні дірки та електрони будуть дифундувати від області засвічення. Тоді на відстані, меншій дифузійної довжини носіїв від області засвічення, існує певна область, що характеризується наявністю вбудованого електричного поля. Тоді електрони і дірки просторово розділяються.

Перерозподіл заряду викликає порушення радіальної симетрії розподілу нерівноважних носіїв у зразку та, відповідно, перерозподіл заряду за всім зразком. У загальному випадку різниця потенціалів між двома довільними точками на зразку буде відмінна від нуля та визначається напрямком вектора вбудованого електричного поля щодо осі, що проходить через точки, у яких виконується вимір, і величиною заряду.

Поводження сигналу, який вимірюється між нерухомими контактами при русі променю через область, що характеризується вбудованим електричним полем, пояснимо на прикладі одномірної моделі планарного p-n-переходу (рис. 1.13) [55].



Рис. 1.13. Сигнал планарного р-п-переходу

Нехай є однорідна п-область в однорідному матеріалі р-типа. При засвіченні зразка ліворуч від п- області електрони, що дійшли до границі переходу, затягуються його полем усередину п-області. Дірки зустрічають на своєму шляху потенційний бар'єр. Просторово-розділені заряди викликають появу різниці потенціалів між контактами А и В.

У міру наближення до границі переходу кількість носіїв заряду, що дійшли до границі, буде рости й досягає максимуму, коли промінь перебуває на границі p-n-переходу. При засвіченню точно по центру n-області просторовий розподіл електронів і дірок, розділених лівою та правою границями переходу, симетричний, заряди взаємно компенсують один одного і сигнал LBIC дорівнює нулю. У міру наближення до правої границі сигнал починає рости по модулю, але із протилежним знаком.

Таким чином, при скануванні променем через планарний p-n-перехід

LBIC реєструє двополярний сигнал, нуль якого збігається із центром симетрії переходу. Цей приклад демонструє принцип роботи LBIC.

<u>Метод фотолюмінесценція</u> (PL). PL - швидкий, неруйнуючий метод характеристики електронних властивостей напівпровідників [47], що дозволяє швидко оцінити параметри матеріалу, ідентифікувати домішки й дефекти. Спектроскопія фотолюмінесцентного збудження (PLE) забезпечує інформацію про спектр поглинання в зразках, де неможливі виміри спектрів пропущення [54]. Вичерпні огляди по фотолюмінесценції в напівпровідниках з акцентом на експериментальні результати представлені в [73].

Основні компоненти PL-системи:

• джерело оптичного збудження, звичайне монохроматичне джерело;

• оптична система фокусування збудливого випромінювання на поверхню зразка та заведення PL- випромінювання в спектрометр;

• спектрометр або монохроматор;

• детектор PL-випромінювання (фотоелектронний помножувач, фотодіод або матриця фотодіодів);

• система керування експериментом, збору даних та їх аналізу.

У фотолюмінесценції з розрізненням часу (TRPL) вимірюється інтенсивність PL як функція часу. При цьому використовується лазерний імпульс для збудження електронів у напівпровіднику. PL- випромінювання реєструється швидкодіючим детектором. Інтенсивність PL може бути виміряна безпосередньо як функція часу за допомогою фотодіода. Однак, щоб одержати більш високе співвідношення сигнал/шум і менший час розрізнення, використовується лічильник одиничних фотонів. За допомогою аналізу PLвипромінювання як функції температури, концентрації вільних носіїв, рівня інжекції, розмірів зразка й т.д., можливо оцінити якість матеріалу й роль різних механізмів рекомбінації в роботі CE [55].

<u>Метод мас-спектрометрії вторинних іонів</u> (SIMS). SIMS високочутливий метод аналізу поверхні й біляповерхневих ділянок твердих тіл. Цей метод використовується в напівпровідниковій промисловості для вивчення розподілу легуючих домішок і забруднень у мікроелектронних матеріалах і приладах. Основний принцип методу полягає в тому, що багатошарові структури аналізують, розсіюючи їх сфокусованим первинним іонним променем. В емітованих цим процесом вторинних іонів аналізується співвідношення маса/заряд за допомогою мас-спектрометра. На противагу методам спектроскопії маси, які використовуються для загального аналізу і вимагають розчинення зразка, SIMS дозволяє досліджувати шаруваті структури, включаючи електронні прилади. Особливості, що роблять SIMS привабливим як аналітичний інструмент (чутливість, розрізнення по глибині й т.д.), приводять також до «артефактів», що утруднюють інтерпретацію даних (бокові неоднорідності, топографія поверхні, варіації виходу іонів). Незважаючи на ці труднощі, SIMS часто є єдиним аналітичним інструментом, здатним зондувати малі елементні концентрації в шарах тонких плівок. SIMS дозволяє вивчати всі елементи періодичної таблиці, так само, як і ізотопи. Він чутливий у широкому діапазоні концентрацій - більше восьми порядків величини. Якщо потрібні кількісні результати, то необхідно використати строго погоджені стандарти для кожного досліджуваного сполучення елемент/матриця. Завдяки великому динамічному діапазону SIMS-дані звичайно зображуються на логарифмічній осі. Дані можуть бути представлені як мас-спектрограма або як профіль глибини. Найбільш загальний метод одержання даних аналізу тонких плівок - динамічний SIMSпрофіль глибини, у якому мас-спектри досліджують як функцію часу розпилення. Вимірюючи глибину отриманої іонним променем заглибу (кратера) профілометром, можна перетворити час розпилення в глибину.

<u>Метод електронної оже-спектроскопії</u> - ґрунтується на вимірі енергії та інтенсивності струму оже-електронів, емітованих із твердого тіла при ожеефекті. Якщо в атомі під дією електронного бомбардування або іншим способом створена вакансія на внутрішній електронній оболонці, збуджений атом через деякий час повертається в основний стан, випускаючи характеристичне електромагнітне випромінювання або здійснює безвипромінювальний ожеперехід. Вакансію на внутрішньому рівні може заповнити електрон, що перебуває на одному із зовнішніх рівнів. У випадку оже-ефекту перехід атома в нормальний стан супроводжується передачею енергії одному з електронів зовнішнього рівня. Цей електрон вилітає з атома з певної, характерною для даного атома кінетичною енергією. По енергетичному спектру оже-електронів можна однозначно визначити елементний склад [72].

В оже-спектроскопії піку оже-електронів привласнюються номери, наприклад, Si1 – 92 eB; Si2 - 1619 eB. Для всіх елементів, крім водню та гелію, на яких оже-перехід неможливий, складений атлас спектрів оже-електронів. Якщо атом перебуває у зв'язаному стані, енергія оже-електронів трохи відрізняється від вільного стану або з'являються нові піки. По змінах спектра можна судити про хімічні зв'язки елементів, однак у цей час атлас спектрів є лише для деяких з'єднань.

Порушення атомів проводиться первинним гострофокусованим електронним пучком з енергією електронів 0,1-10 кеВ. Діаметр пучка 0,1-10 мкм визначає локальність аналізу в площині об'єкта. Використання електронів для порушення атомів, дозволяє додатково реалізувати режими сканувального електронного мікроскопа (SEM), що практично завжди робиться в сучасних ожеспектрометрах. Зображення об'єкта у вторинних, відбитих або поглинених електронах виводиться на екран дисплея, що дозволяє визначати місце аналізу з розрізненням SEM (10 нм). Локальність по глибині визначається глибиною виходу оже-електронів і становить 0,3-3,0 нм залежно від енергії оже-електронів, що перебуває в межах 20-2500 еВ. Низька енергія аналізованих електронів і висока чутливість до поверхневих забруднень вимагає проведення вимірів у надвисокому вакуумі порядку 10-10 мм рт. ст. Оже-спектри реєструються дисперсійними енергоаналізаторами в режимах N(E) - розподілу вторинних електронів по енергіях і d(E)/d - диференційованих спектрів. Розподіл елементів по глибині (рис. 1.14) одержують шляхом іонного розпилення досліджуваної плівки з періодичною реєстрацією оже-електронів.

Для оцінки контактного опору між напівпровідником і металевим контактом використовується спеціальна величина, названа специфічним контактним опором рс, величина якого визначається відповідно до виразу (1.12)

$$\rho_{\rm c} = R_s \cdot L_T \,, \tag{1.12}$$

де  $\rho_c$  – контактний опір;

R<sub>s</sub> – поверхневий опір;

*L<sub>T</sub>* – довжина переносу (трансферна довжина) – відстань від контакту, на якому величина напруги послабляється в *е* раз.



Рис. 1.14. Розподіл по товщині плівки компонентів твердого розчину Cu(In,Ga)(S,Se)<sub>2</sub>

Тоді R<sub>s</sub> можна визначити 4-зондовим методом, U і I визначаються експериментально (рис. 1.15).



Рис. 1.15. Схема вимірювання специфічного контактного опору

Вимір питомого та поверхневого опору 4-зондовим методом. (рис. 1.16).



Рис. 1.16. Електрична схема вимірювання питомого та поверхневого опору 4-зондовим методом: ДН - джерело постійної напруги; U – вольтметр

Для визначення питомого (р) і поверхневого (R<sub>s</sub>) опору отриманих плівок зручно використати 4-зондовий метод виміру, що не потребує створення омічного контакту до досліджуваного зразка. Основна умова - плоска поверхня зразка, лінійні розміри якої перевершують лінійні розміри системи зондів [12].

### Висновки до першого розділу

Розглянуто існуючі конструкції сонячних батарей та СЕ. Проведений аналіз зовнішніх і внутрішніх факторів, що викликають пошкоджуючі дефекти, на сприймаючій поверхні напівпровідникового шару ФЕП, які спричиняють утворення локальних неоднорідностей, мікропор та макротріщин на поверхні НПШ ФЕП та призводять до змін властивостей всередині структури, що зв'язано з такими електрофізичними параметрами як внутрішній опір та фотострум.

Встановлено, що найпоширенішим дефектом у СЕ є тріщини. Вплив тріщин на ефективність сонячного модуля протягом його терміну служби практично неможливо кількісно оцінити. Наявність мікротріщин зменшує видачу потужності СБ, з часом в міру старіння модуля та впливу термічної та механічної напруги можуть з'явитися більше тріщин, що призводить до зменшення ККД СБ.

Проаналізовані існуючі моделі СЕ. Встановлено, що у існуючих моделях сонячного елемента не враховується зміна величини геометричної площі поверхні, що може істотно впливати, при розрахунку вихідних параметрів СЕ. Крім того, аналіз існуючих моделей показує, що в них, вноситься цілий ряд обмежень і допущень, що призводить до значних, а часом небажаних відхилень від ВАХ реального СЕ, що спотворює реальні показники величини вихідної потужності й ККД СЕ. Показана також можливість застосування цілого ряду оптичних, електричних, рентгенівських та інших досліджень, для оцінки якості плівок, що становлять структуру сонячного елемента, а також їх використання, для оцінки технологічних процесів при виготовленні сонячного елемента.

Обґрунтовано, що застосування описаних методів, сприяє розробці надійних, ефективних і дешевих СЕ, однак очевидно, що жоден метод діагностики, не здатний відбити всю різноманітність інформації, щодо параметрів СЕ.

### **РОЗДІЛ 2**

# РОЗРОБКА МЕТОДУ КІЛЬКІСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА

2.1 Розробка геометричної моделі сприймаючої поверхні фотоелектричного перетворювача на основі застосування апарата фрактальної геометрії

При експлуатації СБ на сприймаючу поверхню ФЕП діють різні зовнішні (сонячне та радіаційне опромінення, температура) і внутрішні (структурні зміни матеріалу) фактори. У результаті такого впливу, на поверхні можуть з'являтися різні ушкоджуючі дефекти, у вигляді локальних неоднорідностей, мікропор і макротріщин, що проводить до зміни її геометричної топологічної площі поверхні ФЕП.

Для розгляду впливу ушкоджуючих дефектів сприймаючої поверхні напівпровідникового шару на параметри СЕ, проведені дослідження фізичних процесів, що протікають на зовнішній і внутрішній структурі поверхні ФЕП [41,70].

Відомо [40], що поверхня ФЕП, а також границя розділу металнапівпровідника не є плоскими. Практично є рельєф із шорсткуватою поверхнею або границею розділу, рельєф якої може визначатися як характером обробки (хіміко-динамічна, плазмохімічна, радіаційна), так і способом нанесення бар'єрного металевого контакту (для границі метал-напівпровідник). Наявність ушкоджуючих дефектів приводить до подальшого розвитку рельєфу поверхні ФЕП, що може привести до значного збільшення фактичної площі контакту, що може значно перевищувати топологічну геометричну площу S<sub>G</sub>. Наслідки цього факту, тобто впливу такого контакту на параметри СЕ, не завжди очевидні, тому необхідно оцінити властивості сприймаючої поверхні ФЕП, з урахуванням ушкоджуючих дефектів рельєфу. У роботі, для визначення реальної робочої
площі *S<sub>REAL</sub>*, запропоновано розглянути процеси поверхневого напівпровідникового шару, що протікають у структурі ФЕП, на основі застосування апарата фрактальної геометрії [40]. З погляду фрактальної теорії, площу поверхні ФЕП можна представити у вигляді структурної геометричної моделі, показаної на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Структурна геометрична модель сприймаючої поверхні сонячного елементу

При впливі на поверхню ФЕП зовнішніх і внутрішніх факторів у її структурі відбуваються фізичні процеси, які приводять до утворення дефектів у вигляді: локальних неоднорідностей, мікропор, мікро та макротріщин (рис. 2.1).

Поява таких поверхневих утворень, вносить додаткові геометричні збільшення від різних локальних площ ( $\Delta S_{MT}$ ;  $\Delta S_{MP}$ ;  $\Delta S_{MMT}$ ;  $\Delta S_{LN}$ ) по всій сприймаючій поверхні ФЕП, а також значно впливає на подальшу зміну у внутрішній структурі НПШ ФЕП.

Необхідно відзначити, що в результаті цього, відбувається зменшення фотоактивної площі сприймаючої поверхні на величину суми всіх збільшень ( $\Delta S_{\Sigma}$ =  $\Delta S_{MT}$  +  $\Delta S_{MP}$  +  $\Delta S_{MMT}$  +  $\Delta S_{LN}$ ) і тоді можна визначити реальну площу сприймаючої поверхні ФЕП (*S*<sub>REAL</sub>) згідно виразу (2.1):

$$S_{REAL} = S_G - \Delta S_{\Sigma} = S_G - \left(\Delta S_{MT} + \Delta S_{MP} + \Delta S_{MMT} + \Delta S_{LN}\right), \qquad (2.1)$$

де S<sub>REAL</sub> – реальна площа сприймаючої поверхні ФЕП з ушкоджуючими дефектами;

 $S_G$  – геометрична площа топологічної поверхні ФЕП;

 $\Delta S_{\Sigma}$  – сума геометричних збільшень локальних площ;

*∆S<sub>MT</sub>* – геометричне збільшення локальної площі макротріщини;

*∆S<sub>MMT</sub>* – геометричне збільшення локальної площі мікротріщини;

*∆S<sub>MP</sub>* – геометричне збільшення локальної площі мікропори;

*∆S*<sub>LN</sub> – геометричне збільшення локальної площі неоднорідності.

У роботі [40] показано, що поверхні з ушкоджуючими дефектами являють собою шорсткувату пористу неоднорідну структуру і мають специфічними фрактальні властивості: самоподібності, інваріантності, масштабованості та оцінюються кількісною величиною - фрактальною розмірністю. Як відомо [40], величина фрактальної розмірності *d*<sub>*f*</sub>, визначає ступінь заповнювання евклідового простору структури поверхні із фрактальними властивостями.

Тоді, виходячи із застосування апарата фрактальної геометрії, одержимо вираз (2.2) для опису реальної площі *S*<sub>REAL</sub> сприймаючої поверхні ФЕП, що має фрактальні властивості, з використанням величини фрактальної розмірності *d*<sub>f</sub>:

$$S_{REAL} = S_G \cdot \alpha^{d-d_{fr}}, \qquad (2.2)$$

де *S<sub>REAL</sub>* – реальна площа сприймаючої поверхні ФЕП, що має фрактальні властивості;

d – топологічна евклідова розмірність ( $d_1 = 1$  для прямій,  $d_2 = 2$  для площини,  $d_3 = 3$ , для об'єму);

 $d_f$  – фрактальна розмірність структури поверхні НПШ ФЕП;

 α – вимірювальний масштабний безрозмірний коефіцієнт, що задовольняє умові α < 1.</li>

Важливо відзначити, що якщо геометрична площа гладкої поверхні ФЕП, перевищує значення реальної площі тобто  $S_G > S_{REAL}$ , то повинна виконуватися умова, при якій розмірність фрактальної поверхні перевищує евклідову розмірність, тобто  $d_2 < d_f$  при  $d_2 = 2$ .

Тоді згідно [40], вираз (2.2) буде мати вигляд згідно виразу (2.3):

$$S_{REAL} = S_G \cdot \alpha^{2-d_{fr}}, \qquad (2.3)$$

З виразу (2.3), випливає, що при  $d_f = d = 2$  (тобто при рівності фрактальної та топологічної розмірності), підтверджується рівність  $S_G = S_{REAL}$ , і тоді можна зробити висновок про нефрактальність поверхні. Якщо сприймаюча поверхня є фрактальним об'єктом а, отже, її площа  $S_G > S_{REAL}$ , тоді, як випливає з виразу (2.2), для фрактальної розмірності повинна виконуватися наступна умова  $2 < d_f < 3$ . Це співвідношення дозволяє дати більше строге визначення фрактальної розмірності.

З виразу (2.3) також видно, що як характеристику вимірювального масштабу для заданої площі, може бути використаний безрозмірний параметр *а*. Для фрактальної поверхні сонячного ФЕП, відповідно до виразу (2.3), певному значенню масштабному безрозмірному коефіцієнту *a*, відповідає певне значення площі фрактальної поверхні.

Якщо побудувати залежність  $\ln \frac{S_{REAL}}{S_G}$  від  $\ln \frac{1}{\alpha}$  по куту нахилу її лінійної ділянки, можна визначити теоретичну величину фрактальної розмірності  $d_f$ , яка зображена на рис. 2.2. 3 рис 2.2 а, видно, що при гладкій топологічній поверхні (високої якості, близької до ідеальної), тобто коли  $\ln \frac{S_{REAL}}{S_G} \approx 1$ , а значить при d = 2 $\approx d_f$ , практично відсутній кут нахилу. Незначний кут нахилу пояснюється присутністю на поверхні ФЕП локальних неоднорідностей і пор з розміром  $\alpha <$  3...5...5µm, отриманих при виготовленні, і надалі, при проведенні обчислювального експерименту, є умовою вибору вимірювального масштабу.



Рис. 2.2.. Визначення величини фрактальної розмірності поверхні напівпровідникового шару ФЕП:

а) для геометричної поверхні  $S_G$  при  $d = d_f$ ;

б) для реальної площі фрактальної поверхні  $S_{REAL}$  при  $2 < d_f < 3$ .

3 рис. 2.2 б, видно, що при  $d_f > d_2$ , кут нахилу лінійної ділянки залежить від зміни величини реальної площі фрактальної поверхні, а саме, її зменшення, фрактальна розмірність прагне до евклідової розмірності об'ємного простору  $d_f \rightarrow d_3 = 3$  напівпровідникові шари товщиною  $\delta$ .

Отже, при врахуванні впливу ушкоджуючих факторів, на поверхні ФЕП, необхідно враховувати, як зміну поверхневого рельєфу, так і внутрішню об'ємну структуру напівпровідникового шару.

Геометричний і, відповідно, фрактальний об'єм структури НПШ ФЕП, при врахуванні впливу ушкоджуючих факторів, визначаються згідно виразів (2.4) і (2.5):

$$V_G = S_G \cdot \delta \,, \tag{2.4}$$

$$V_F = V_G \cdot \alpha^{d_3 - d_f} = S_G \cdot \delta \cdot \left(\alpha^{d_3 - d_f}\right), \tag{2.5}$$

де  $V_G$  – об'єм геометричної структури напівпровідникового шару ФЕП;

*V<sub>F</sub>* – об'єм реальної структури напівпровідникового шару ФЕП із фрактальными властивостями;

 $\delta_f$  – товщина фрактальної поверхні НПШ ФЕП;

 $d_f$  – фрактальна розмірність внутрішньої структури напівпровідникового шару ФЕП, при 2 <  $d_f$  < 3;

 $d_3$  – евклідова розмірність для об'ємної структури напівпровідникового шару ФЕП, при  $d_3 = 3$ ;

 α – вимірювальний масштабний безрозмірний коефіцієнт, що задовольняє умові α < 1.</li>

Тоді збільшення внутрішньої структури з врахуванням фрактальних властивостей буде визначатися згідно виразу (2.6):

$$\Delta V = V_G - V_F = S_G \cdot \delta_f - S_G \cdot \delta_f \cdot \left(\alpha^{d_3 - d_f}\right) = S_G \cdot \delta_f \cdot \left(1 - \alpha^{3 - d_f}\right), \quad (2.6)$$

де  $V_F$  – фрактальний об'єм структури НПШ ФЕП;

*S*<sub>*F*</sub> – площа фрактальної поверхні ФЕП.

З виразу (2.6) видно, що зміна структури сприймаючої поверхні ФЕП, відбувається як на горизонтальному поверхневому рельєфі зі степеневим показником (2 –  $d_f$ ), так і вертикально по товщині  $\delta_f$  усього об'єму з показником (3 –  $d_f$ ).

З виразу (2.6), видно, що при  $d_f = 3$ , степеневий показник  $d_3 - d_f \rightarrow 0$ , тобто збільшення  $\Delta V \rightarrow 0$ . Отже, при розрахунку основних параметрів ФЕП, необхідно враховувати реальні зміни в об'ємній реальній структурі напівпровідникового шару ФЕП, шляхом добутку величини геометричної площі  $S_G$  на показник  $1-\alpha^{3-d_f}$ , отримуємо вираз (2.7):

$$S_{REAL} = S_G \left( 1 - \alpha^{d_3 - d_f} \right) = S_G \left( 1 - \alpha^{3 - d_f} \right).$$
(2.7)

В роботі запропоновано розглядати реальну площу  $S_{REAL}$  ФЕП, як зміну геометричної площі  $S_G$  фрактальної поверхні в степеневій залежності від зміни величини фрактальної розмірності структури в інтервалі  $2 < d_f < 3$ .

# 2.2 Удосконалення аналітичних виразів моделі сонячного елемента для методу оцінювання якості параметрів структури сприймаючої поверхні фотоелектричного перетворювача

На основі вище викладених обґрунтувань, були запропоновані аналітичні вирази, що визначають удосконалену модель роботи ФЕП, з урахуванням величини реальної площі сприймаючої поверхні *S<sub>REAL</sub>* ФЕП, розрахованої із застосуванням апарата фрактальної геометрії [40].

Тоді, підставляючи вирази (1.18) в (1.3), (1.5), (1.6), (1.8-1.11), одержуємо аналітичні вирази для вдосконаленої моделі ФЕП, з урахуванням реальної площі сприймаючої поверхні напівпровідникового шару ФЕП:

– для величини фотоструму *I<sub>F</sub>* отримаємо вираз (2.8):

$$I_F = \frac{F_o \cdot e}{h \cdot v} \cdot (1 - R) \cdot \eta \cdot K_c \cdot S_G \cdot (1 - \alpha^{3 - d_f}), \qquad (2.8)$$

де F<sub>0</sub> – вхідний світловий потік;

е – заряд електрона;

*h* – постійна Планка;

*v* –частота падаючого світлового потоку;

*R* – коефіцієнт відбиття світлового потоку від фронтальної поверхні;

*п* – коефіцієнт відбитого світлового потоку фронтальної поверхні;

Кс – інтегральний коефіцієнт збирання носіїв;

 $S_G$  – геометрична площа топологічної поверхні  $\Phi E \Pi$ ;

 $d_f$  – фрактальна розмірність внутрішньої структури напівпровідникового шару ФЕП 2 <  $d_f$  < 3;

 $\alpha$  — вимірювальний масштабний безрозмірний коефіцієнт, що задовольняє умові $\alpha < 1;$ 

– для напруги холостого ходу *U*<sub>XXf</sub> отримаємо вираз (2.9):

$$U_{XXf} = \frac{kT}{e} \cdot \ln\left[\frac{F_0(1-R) \cdot \eta \cdot K_C \cdot S_G \cdot \left(1-\alpha^{3-d_f}\right)}{hvI_0}\right] + 1; \qquad (2.9)$$

– для струму короткого замикання *I*<sub>sc</sub> отримаємо вираз (2.10):

$$I_{sc} = \frac{F_o \cdot e}{h \cdot v} \cdot (1 - R) \cdot \eta \cdot K_c \cdot S_G -$$

$$-\frac{F_o \cdot e}{h \cdot v} \cdot (1 - R) \cdot \eta \cdot K_c \cdot S_G \cdot (1 - \alpha^{3 - d_f});$$
(2.10)

– для струму навантаження  $I_N$  отримаємо вираз (2.11):

$$I_{N} = \frac{F_{o} \cdot e}{h \cdot v} \cdot (1 - R) \cdot \eta \cdot K_{c} \cdot S_{G} \cdot (1 - \alpha^{3 - d_{f}}) - I_{ON} \left[ \exp\left(\frac{e \cdot (U_{N} + I_{N} \cdot R_{p})}{A \cdot k \cdot T}\right) - 1\right] - \frac{U_{N} + I_{N}}{R_{S}}; \qquad (2.11)$$

– для вихідної напруги *U<sub>N</sub>* отримаємо вираз (2.12):

$$U_{N} = \left(\frac{kT}{e}\right) \cdot \ln \left(\frac{\left[\frac{F_{o} \cdot e}{h \cdot v} \cdot (1 - R) \cdot \eta \cdot K_{c} \cdot S_{G}\right] - I_{N}}{I_{0}} + 1\right) - \left(\frac{kT}{e}\right) \cdot \ln \left(\frac{\left[\frac{F_{o} \cdot e}{h \cdot v} \cdot (1 - R) \cdot \eta \cdot K_{c} \cdot S_{G} \cdot (1 - \alpha^{3 - d_{f}})\right] - I_{N}}{I_{0}} + 1\right);$$

$$(2.12)$$

– для максимальної вихідної потужності *P<sub>max</sub>* отримаємо вираз (2.13):

$$P_{\max} = F_{Z} \frac{kT}{e} \cdot \ln \left[ \frac{F_{0}(1-R) \cdot \eta \cdot K_{C} \cdot S_{G}}{hvI_{0}} \right] \cdot \left[ \frac{F_{o} \cdot e}{h \cdot v} \cdot (1-R) \cdot \eta \cdot K_{c} \cdot S_{G} \right] - \qquad (2.13)$$
$$-F_{Z} \frac{kT}{e} \cdot \ln \left[ \frac{F_{0}(1-R) \cdot \eta \cdot K_{C} \cdot S_{G} \cdot (1-\alpha^{3-d_{f}})}{hvI_{0}} \right] \cdot \left[ \frac{F_{o} \cdot e}{h \cdot v} \cdot (1-R) \cdot \eta \cdot K_{c} \cdot S_{G} \cdot (1-\alpha^{3-d_{f}}) \right]$$

Для сприймаючої поверхні з ушкоджуючими дефектами,  $\eta_{eff}$  CE буде визначатися згідно виразу (2.14):

$$\eta_{eff} = \frac{\left[\frac{F_o \cdot e}{h \cdot v} \cdot (1 - R) \cdot \eta \cdot K_c\right] \cdot \frac{kT}{e} \cdot \ln\left[\frac{F_o(1 - R) \cdot \eta \cdot K_c \cdot S_G}{hvI_0}\right] + 1}{E_c} - \frac{\left[\frac{F_o \cdot e}{h \cdot v} \cdot (1 - R) \cdot \eta \cdot K_c\right] \cdot \frac{kT}{e} \cdot \ln\left[\frac{F_o(1 - R) \cdot \eta \cdot K_c \cdot S_G \cdot (1 - \alpha^{3 - d_f})}{hvI_0}\right] + 1}{E_c}$$

$$(2.14)$$

З виразу (2.14), випливає, що ККД СЕ  $\eta_{eff}$  залежить як від світлового випромінювання та температури, так і від зміни геометричної площі сприймаючої поверхні ФЕП з ушкоджуючими дефектами. При цьому, враховується ступенева залежність реальної площі сприймаючої поверхні з ушкоджуючими дефектами від зміни величини фрактальної розмірності в об'ємній структурі по всій товщині НПШ ФЕП.

Таким чином, аналітичні вирази (2.8)-(2.14) удосконаленої моделі дозволяють розраховувати вихідні параметри та ККД СЕ, з урахуванням зміни реальної площі сприймаючої поверхні НПШ ФЕП, а, отже, точно визначати ВАХ та ВВХ СЕ [41,70,79].

### Висновки до другого розділу

Виконано аналіз фізичних процесів при ушкоджуючих дефектах у структурі сприймаючої поверхні ФЕП, викликаних зовнішніми та внутрішніми факторами, що показав їхній вплив на:

 – зниження величини вихідної потужності й коефіцієнта корисної дії при тривалій експлуатації;

 – зміна паспортних характеристик, наданих виробником і, як наслідок, невідповідність реальним ВАХ і ВВХ через деякий ступінь наближеності, з урахуванням допущень про стан реальної поверхні ФЕП;

– зміна ступеня заповнення ВАХ для встановленого ККД.

Запропонований новий підхід, для вивчення фізичних процесів у структурі сприймаючої поверхні ФЕП, на основі апарата фрактальної геометрії, що враховує ушкоджуючі дефекти при розрахунку номінальної потужності.

Вперше, розроблена геометрична модель сприймаючої поверхні напівпровідникового шару ФЕП, яка дозволила врахувати фізичні процеси при зміні властивостей зовнішньої та внутрішньої структури сприймаючої поверхні напівпровідникового шару ФЕП за наявності локальних неоднорідностей, мікропор і макротріщин, що впливають на величину робочої площі з урахуванням змін величини фрактальної розмірності.

Побудована геометрична модель рельєфу сприймаючої поверхні враховує в структурі напівпровідникового шару ФЕП наявність локальних неоднородностей, мікропор і макротріщин, що впливають на величину робочої площі ФЕП.

Показано, що такі структури володіють фрактальними властивостями й характеризуються кількісною величиною фрактальної розмірності. На основі застосування апарата фрактальної геометрії, була визначена реальна площа сприймаючої активної поверхні ФЕП, що перебуває в степеневій залежності від фрактальної розмірності та відповідає її певному значенню. Теоретично і експериментально обґрунтований вибір параметра фрактальної розмірності як ефективний критерій оцінки розвиненості мікро- і макроструктури сприймаючого поверхневого шару ФЕП.

Запропоновано використання параметра фрактальної розмірності стосовно до завдань розрахунку величини реальної вихідної потужності й ККД ФЕП. Показано перевагу використання методу кількісного оцінювання якості параметрів сонячного елемента для побудови фрактальних поверхонь перед класичними моделями негладких форм як для повного опису геометрії поверхневого шару ФЕП, так і для подальшого розрахунку параметрів ФЕП. Побудова моделі поверхні з використанням фрактальних принципів, обґрунтована теоретично та покладена в основу дослідження впливу геометрії мікро- і макроструктури поверхні на фізичні властивості досліджуваних матеріалів поверхневого шару ФЕП. Результати проведеного аналізу показують, що методика вивчення розвиненості структури поверхні ФЕП, заснована на теорії фракталів, дає можливість оцінки характерних ушкоджуючих дефектів, які знаходяться у діапазоні значень від 0,03 до 3 мкм.

Удосконалено модель ФЕП для розрахунку вихідних параметрів з урахуванням робочої площі реальної сприймаючої поверхні, що дозволяє підвищувати точність, стабільність ВАХ і визначати реальне значення величини вихідної потужності й ККД ФЕП.

Набули подальшого розвитку вдосконалені аналітичні вирази для оцінки параметрів сонячного елемента, які, на відміну від відомих, враховують степеневу залежність реальної площі сприймаючої поверхні, від зміни величини фрактальної розмірності в об'ємній структурі по всій товщині напівпровідникового шару ФЕП.

Отримані аналітичні вирази вдосконаленої моделі ФЕП дозволили також розрахувати та уточнити вхідні параметри (струму короткого замикання, напруги холостого ходу, максимальної вихідної потужності), які відмінні від установлених заводських значень.

#### РОЗДІЛ З

# ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНІ СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ КІЛЬКІСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПАРАМЕТРІВ

# 3.1 Порядок проведення експериментальних досліджень на фізичній моделі сонячного елемента

Для визначення характеристик та проведення досліджень сонячних фотовольтаничних систем в різних режимах роботи на сьогоднішній день набули широкого поширення системи схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink, які представляють собою потужній інструмент для моделювання. Simscape, що є частиною середовища Simulink, має блок сонячних батарей, що спрощує процес побудови моделі та дозволяє вносити зміни в процес моделювання, з повною демонстрацією отриманих результатів. [25,39].

Система схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink/Simscape пропонує опції готових блоків для імітації реальних фізичних процесів, які відбуваються в середині СБ. В роботі [25], автори стверджують, що визначальними технічними параметрами для оцінки техніко-економічної ефективності СБ є: номінальна потужність, розміри та термін служби СБ. Такі технічні параметри, як: напруга холостого ходу, струм короткого замикання, струм в точні максимальної потужності та інші, не впливають на оцінку економічної ефективності та приблизно рівні для всіх типів СБ.

Моделювання на стадії проєктування дозволяє враховувати параметри СБ, та отримувати результати по вихідним параметрам вже на стадії проєктування, проводити аналіз по визначення шляхів підвищення техніко-економічних показників роботи сонячних електричних станцій.

СЕ є основним елементом для створення фотоелектричного модуля. Розширена бібліотека компонентів SimElectronics, що входить до складу бібліотеки Simscape систем схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink містить блок Solar Cell (сонячний елемент) (рис. 3.1), який моделює поведінку реального CE.



Рис. 3.1. Блокове зображення сонячного елемента

Модель блоку Solar Cell подає CE як паралельну комбінацію джерела струму, двох експоненційних діодів і паралельного резистора  $R_p$ , які з'єднані послідовно з опором  $R_s$  (рис. 3.2.):



Рис. 3.2. Еквівалентна схема блоку Solar Cell

Сила вихідного струму фотоелементу І, визначається згідно виразу (3.1):

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[ e^{\frac{e(U+IR_s)}{N_1 kT}} - 1 \right] - I_{s2} \left[ e^{\frac{e(U+IR_s)}{N_2 kT}} - 1 \right] - \frac{U+IR_s}{R_p},$$
(3.1)

де  $I_{ph} = I_{ph0} \cdot \frac{I_r}{I_{r0}}$  – сила фотоструму;  $I_r$  – освітленість (інтенсивність світла) фотоелементу у Вт/м<sup>2</sup>;  $I_{ph0}$  – сила фотоструму, що генерується при освітленості  $I_{r0}$ ; *I*<sub>s1</sub>, *I*<sub>s2</sub> – струми насичення першого та другого діодів відповідно;

*k* – стала Больцмана;

Т – температура фотоелементу;

е – елементарний заряд;

 $N_1, N_2$  – коефіцієнти неідеальності вольт-амперних характеристик першого та другого діодів відповідно;

*U* – напруга на фотоелементі.

У блоці Solar Cell реалізовано можливість або враховувати всі параметри виразу (3.1) – так звана 8-параметрична модель, або враховувати тільки перші два доданки виразу (3.1) – так звана 5-параметрична модель, за рахунок наступних припущень:

- струм насичення другого діоду дорівнює нулю;
- опір паралельного резистора нескінченно великий.

При виборі 5-параметричної моделі можна або використовувати параметри рівняння (3.1) { $I_{ph0}$ ,  $I_{r0}$ ,  $I_{s1}$ ,  $N_1$ ,  $R_s$ }, або задавати значення струму короткого замикання  $I_{sc}$  і напруги холостого ходу  $U_{oc}$ , які використовуються моделлю для розрахунку  $I_{ph0}$  та  $I_{s1}$ .Сила фотоструму  $I_{ph}$  також визначається температурою фотоелементу. В моделі реалізовано наступну залежність  $I_{ph}$  від T, яка визначається згідно виразу (3.2):

$$I_{ph}(T) = I_{ph} \cdot \left(1 + TIPH1 \cdot (T - T_{meas})\right), \tag{3.2}$$

де *TIPH*1 – температурний коефіцієнт першого порядку;

 $T_{meas}$  — температура, при якій вимірювався  $I_{ph}.$ 

Для моделювання параметрів СЕ розроблений алгоритм побудови математичної моделі поверхні напівпровідникового шару ФЕП, який представлений на рис 3.3 [39].



Рис. 3.3. Алгоритм побудови математичної моделі СЕ в системах схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink з урахуванням площі активної поверхні

В якості вхідних параметрів для дослідження СЕ були використані значення струму короткого замикання, напруги холостого ходу, максимальної

потужності та температурні коефіцієнти, які наведені в паспортних даних виробника.

Вихідні параметри моделі СБ - максимальна потужність, ККД, коефіцієнт заповнення ВАХ та ВВХ та залежність вихідної потужності СБ від робочої напруги.

Основою побудови моделі СБ в системах схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink є модель одиничного CE.

В алгоритмі побудови математичної моделі СЕ (рис. 3.3) представлений загальний математичний опис сонячного елемента, який дозволяє розробити алгоритм моделювання СЕ та представити модель на одній з мов моделювання.

Для реалізації алгоритму побудови математичної моделі СЕ був використаний обчислювальний апарат систем схемотехнічного моделювання MATLAB/ Simulink [39].

Для дослідження процесів в CE і побудови його характеристик в середовищі Simscape застосована модель, яка представлена на (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Simscape-модель для дослідження сонячного елемента

Вихідними даними для моделювання в системах схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink були параметри CE Axioma energy P 0,43-D, які наведені у таблиці 3.1.

88

Електричний параметр	Значення параметрів
Потужність MPPT (Pmax)	0,43 Вт
Струм короткого замикання (Isc)	0.88 A
Напруга холостого ходу (Voc)	0.46 B
Струм МРРТ (Ітрр)	0,86 A
Напруга МРРТ (Vmpp)	0,44 B

## Характеристика сонячної батареї Axioma energy P 0,43-D

Інтенсивність сонячного світла з блоку Irradiance подається на вхідний порт «Ir» блоку Solar panel і таким чином надходить до кожного CE. Також вона поступає на вхід блоку Thermal model, де формується відповідний їй тепловий потік, що надходить на вхідний порт «H» блоку Solar Cell.

Інтенсивність сонячного світла послідовно помножується на площу панелі СЕ і на її альбедо. Таким чином розраховується тепловий потік, що поступає на СЕ і додається до внутрішнього тепла СЕ.

Температура СЕ вимірюється датчиком температури, покази якого подаються на вихідний порт «Т» блоку. Фотоелементи нагріваються і починають віддавати тепло навколишньому повітрю. Цей процес моделюється за рахунок блоків конвективної і радіаційної теплопередачі.

До електричних клем СБ підключене електричне коло, яке складається з амперметру Current Sensor та ідеального джерела напруги Controlled Voltage Source, керованого вхідним сигналом, що подається з блоку Ramp. Блок лінійної зміни сигналу Ramp формує сигнал у діапазоні від 0 до значення напруги холостого ходу сонячної панелі. Така схема дозволяє вимірювати BAX CБ, та визначати значення максимальної електричної потужності, генерованої СБ.

Виміряне значення сили струму та сигнал з виходу блоку Ramp подаються на осцилограф Scope і блок множення сигналів, в якому розраховується значення електричної потужності СБ.

Параметри СЕ, які використовувалися для моделювання в системах схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink, представлені у табл. 3.2.

На підставі результатів моделювання в системах схемотехнічного

моделювання MATLAB/Simulink, які представлені у табл. 3.2 були побудовані графіки залежності, струму і вихідної потужності від напруги СЕ при різних площах пошкодження поверхні СЕ, вони представлені на рис. 3.5 (а-к).

## Таблиця 3.2

## Параметри сонячного елемента для моделювання за допомогою систем схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink

	Один	Числові значення дослідів									
Параметри	иці вимір У	<b>№</b> 1	Nº2	<u>№</u> 3	<u>№</u> 4	№5	№6	<u>№</u> 7	<b>№</b> 8	№9	<b>№</b> 10
Температу ра повітря	К		298								
Площа сонячного елемента	10 <sup>-3</sup> м <sup>2</sup>	14,4	14,39	14,398	14,397	14,396	14,395	14,394	14,393	14,392	14,391
Теплоємніс ть кремнію	Дж/кг •с		840								
Енергія фотону	эВ		1,11								
Початкова температур а пластини сонячного елемента	°C		25								
Сонячна радіація	BT/m <sup>2</sup>		1000								
Коефіцієнт затемнення ВАХ Q <sub>f</sub>	-		1,5								
Тепловий коефіцієнт	-		3,38								
Товщина пластини	М		0,003								
Напруга холостого ходу U <sub>OC</sub>	В	0,46	0,45	0,44	0,42	0,41	0,38	0,35	0,33	0,32	0,31

Отримані в системах схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink криві представлені на рис. 3.5. на графіках якого показані залежність струму і вихідної потужності від напруги СЕ, щодо різних значень площі НПШ ФЕП.



Рис. 3.5. Графіки результатів моделювання процесу роботи сонячного елемента в системах схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink при різних площах пошкодження поверхні сонячного елемента: графіки а-г різних значень площі сприймаючої поверхні згідно таблиці 3.2

Отримані в системах схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink криві представлені на рис. 3.6. на графіках якого показані результати моделювання процесу роботи СЕ в системах схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink при різних площах пошкодження поверхні СЕ графіки *д-к* різних значень площі сприймаючої поверхні згідно таблиці 3.2





Для підтвердження результатів моделювання процесу роботи сонячного елемента в системах схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink було створено лабораторну установку, яка представлена на рис. 3.7.

До складу лабораторної установки входять такі пристрої:

1.Сонячна батарея АВЗЗО-72Р (120 фотоелементів)

- 2.Амперметр
- 3.Вольтметр
- 4. Сонячний елемент Axioma energy P 0,43-D
- 5. Мультиметр
- 6.Компьтери
- 7.Осцилограф



Рис. 3.7. Лабораторний макет експериментальної установки для проведення фізичного експерименту на сонячному елементі сонячної батареї

Вимірювальна схема експериментальної установки для проведення фізичного експерименту на СЕ представлена на рис. 3.8.



Рис. 3.8. Вимірювальна схема лабораторної установки

Для експериментального дослідження СЕ були вибрані наступні вхідні параметри: різні рівні освітлення та спектральний склад падаючого випромінювання, затінення окремих СЕ, коефіцієнт втрат падаючого випромінювання, характеристики напівпровідникового матеріалу СЕ та його паспортні параметри, робоча температура, потоки радіаційного опромінення сонця, коефіцієнт втрат, який враховує вплив деструктивних факторів та старіння сприймаючої поверхні структури ФЕП, коефіцієнти розкиду технологічних параметрів СЕ. Вихідними даними для обробки первинних значень були параметри CE Axioma energy P 0,43-D та сонячної панелі AB330-72Р, які наведені у таблиці 3.1 та таблиці 3.3. При проведенні експериментальних досліджень на поверхні СЕ були штучно створені дефекти у вигляді подряпин, пор. Поступово збільшуючи площу пошкодження поверхні CE від 0,000001 м<sup>2</sup> до 0,00001 м<sup>2</sup>, вимірювався струм та напруга СЕ. На рис. 3.9 представлені пошкодження поверхні СЕ, які наносилися під час експериментальних досліджень: загальний вигляд та фрагмент поверхні з пошкодженням, збільшений у 10 разів.



Рис. 3.9. Фраагмент пошкодження поверхні сонячного елемента, а) загальний вигляд сонячного елемента; б) збільшений в 10 раз фрагмент поверхні сонячного елемента з нанесеними пошкодженнями.

94

Електричний параметр	Значення параметрів
Максимальна потужність (Р <sub>max</sub> )	330 W
Напруга при максимальній потужності (V <sub>mpp</sub> )	37.5 V
Струм при максимальній потужності (І <sub>трр</sub> )	8.8 A
Напруга відкритого ланцюга(V <sub>oc</sub> )	45.9 V
Струм короткого замикання (I <sub>sc</sub> )	9.12 A
ККД панелі	17.01 %

Параметри сонячної батареї АВЗЗО-72Р

Результаті експериментальних досліджень на лабораторній установці на СЕ представлені у табл. 3.4.

## Таблиця 3.4

N n∖n	S <sub>пошк</sub> , 10 <sup>-3</sup> м <sup>2</sup>	ΔЅ <sub>пошк</sub> ,м2	I <sub>MPP</sub> , A	U <sub>MPP</sub> , B
1	14,4	0,001	0,1409	0,4706
2	14,399	0,001	0,1407	0,4703
3	14,398	0,001	0,1405	0,4700
4	14,397	0,001	0,1404	0,4697
5	14,396	0,001	0,1402	0,4696
6	14,395	0,001	0,1400	0,4695
7	14,394	0,001	0,1398	0,4694
8	14,393	0,001	0,1396	0,4693
9	14,392	0,001	0,1394	0,4691
10	14,391	0,001	0,1393	0,4690
11	14,390	0,001	0,1391	0,4688
12	14,389	0,001	0,1389	0,4685
13	14,388	0,001	0,1387	0,4683

Результати дослідження параметрів СЕ, при різній площі пошкодження

На рис. 3.10-3.11 представлені залежності струму, напруги СЕ від площі пошкодження СЕ, отримані при експериментальних дослідженнях.



Рис. 3.10. Графіки залежності струму від площі пошкодження сонячного елемента, отримані при експериментальних дослідженнях



Рис. 3.11. Графіки залежності напруги від площі пошкодження сонячного елемента, отримані при експериментальних дослідженнях

З графіка рис. 3.10 випливає, що зі зменшенням значення величини струму навантаження, зменшується площа активної сприймаючої поверхні. Це можна пояснити тим, що з пошкодженням внутрішньої структури НПШ ФЕП (тобто

появою мікро- і макропор, тріщин у структурі напівпровідникового шару) збільшується внутрішній (шунтуючий) опір, що призводить до зменшення фотоструму і відповідно зменшення величини вихідної напруги та ККД СЕ та СБ.

Внутрішній опір R<sub>BH</sub> CE визначається згідно виразу (3.3):

$$R_{\rm BH} = \frac{U_{\rm 0C}}{I_{SC} - I_{MPP}} \tag{3.3}$$

З метою визначеня параметрів СЕ був розрахований внутрішній опір СЕ в залежності від площі пошкодження СЕ, згідно виразу (3.3).

Результати розрахунків представлені в табл. 3.5 та рис. 3.12. 3 рис. 3.12 видно, що зі зменшенням площі сприймаючої поверхні зростає внутрішній опір фотоелектричного перетворювача.

Таблиця 3.5

Результати розрахунків внутрішнього опору сонячного елементу, при різній площі пошкодження поверхні

n\n	$S_{\text{пошк}}, 10^{-3} \text{m}^2$	R, Ом
1	14,4	42,4
2	14,399	45,7
3	14,398	48,5
4	14,397	52,8
5	14,396	54,0
6	14,395	55,2
7	14,394	56,6
8	14,393	59,4
9	14,392	62,5
10	14,391	66,1
11	14,390	70,0
12	14,389	73,2
13	14,388	78,0



Рис. 3.12. Графіки залежності внутрішнього опору сонячного елемента, при різних значеннях площі пошкодження поверхні

Таким чином, для досягнення стабільності та точності ВАХ і ВВХ СЕ необхідно враховувати величину площі активної сприймаючої поверхні ФЕП в аналітичних виразах при моделюванні СЕ.

Для порівняння результатів, отриманих за допомогою систем схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink та експериментальних досліджень, було отримано графік залежності величини площі активної поверхні ФЕП від величини струму навантаження та напруги.

Порівняння теоретичних та експериментальних даних (рис. 3.13-3.16), показало адекватність запропонованих моделей СЕ з урахуванням реальної величини площі сприймаючої поверхні ФЕП, оскільки розбіжності становлять не більше 5%.

Широкі можливості з моделювання фізичних процесів закладені в основу бібліотеки Simscape в системах схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink, дозволяють проводити всебічне дослідження ефективності



Рис. 3.13. Вольт-амперні характеристики сонячного елемента, отримані за допомогою експериментальних досліджень

Розроблений метод кількісного оцінювання якості параметрів СЕ у системах схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink дозволив зв'язати електричні параметри СЕ з рівнем освітленості, температурою середовища та геометричними розмірами поверхні.



Рис. 3.14. Вольт-ватні характеристики сонячного елемента, отримані за допомогою експериментальних досліджень

В результаті порівняння моделювання та експериментальних даних була отримана адекватна модель з розходженням не більше 5%, що є прийнятним результатом для моделювання.

Впровадження результатів дослідження спрощує розрахунок параметрів на вході та виході СБ для побудови сонячних станцій та оцінки ефективності запропонованих рішень.



Рис. 3.15. Графіки порівняння ВАХ сонячного елемента отриманих теоретичних результатів із даними експериментальних досліджень



Рис. 3.16. Графік порівняння BBX сонячного елемента отриманих теоретичних результатів із даними експериментальних досліджень

Результати моделювання дозволяють зробити висновок, що модель

враховує основні фактори, що впливають на функціювання СБ та в цілому адекватно відображає вихідні характеристики СБ.

Наступні дослідження необхідно спрямовувати на уточнення параметрів моделі з метою наближення результатів моделювання до реальних експлуатаційних показників.

**3.2** Удосконалення методу кількісного оцінювання якості параметрів сонячного елемента

# 3.2.1 Дослідження залежності реальної площі сприймаючої поверхні фотоелектричного перетворювача від фрактальної розмірності

Дослідження залежності вихідних параметрів  $P_V$ ,  $U_N$ ,  $I_N$  від реальної площі  $S_{REAL}$  сприймаючої поверхні ФЕП, проведено на основі обчислювального експерименту, з використання обчислювальної програми MatCad.

На початку експерименту, обчислювальним методом, для різних значень величини реальної площі сприймаючої поверхні ФЕП, були побудовані залежності  $\ln \frac{S_{REAL}}{S_G}$  від  $\ln \frac{1}{\alpha}$ . Потім, по куту нахилу її лінійної ділянки, визначалася величина фрактальної розмірності для відповідної їй площі, як показано на рис. 3.17.

Результати показані на графіках рис. 3.17., де значення вимірювального масштабу  $\alpha = 3...6 \cdot 10^{-6}$  *м* приймалися, виходячи з розміру локальної пори 3...5...5  $\mu m$  при товщині напівпровідникового шару  $\delta = 300 \ \mu m$ . З графіків рис. 3.18 видно, що зі зміною величини фронтальної розмірності від 2.01 до 2.93, площа поверхні з вихідного значення 14.400·10<sup>-3</sup> м<sup>2</sup>, зменшується до реальної площі поверхні рівною 14.374·10<sup>-3</sup> м<sup>2</sup>. Це підтверджує результати теоретичних досліджень про відповідність величини фрактальної розмірності певному значенню реальної площі ФЕП, та степеневу залежність геометричної топологічної поверхні від величини фрактальної розмірності.



Рис. 3.17. Графіки залежності  $\ln \frac{S_{REAL}}{S_G}$  від  $\ln \frac{1}{\alpha}$  для визначення фрактальних размірностей для різних площ поверхні ФЕП

У ході проведення експерименту, була отримана узагальнена залежність величини реальної площі поверхні ФЕП *S*<sub>REAL</sub> від величини фрактальної розмірності *d*<sub>f</sub> об'ємної структури НПШ ФЕП, як показано на графіку рис. 3.18.



Рис. 3.18. Залежності величини реальної площі поверхні ФЕП від величини фрактальної розмірності об'ємної структури НПШ ФЕП

3 рис. 3.18 видно, що зміна величини фрактальної розмірності  $d_f$  в інтервалі 2 <  $d_f$  < 2.93, приводить до зменшення реальної площі сприймаючої поверхні від 14.400·10<sup>-3</sup> м<sup>2</sup> до 14.374·10<sup>-3</sup> м<sup>2</sup> і таким чином підтверджуються результати раніше отриманих теоретичних досліджень [5,20,24,41,79,86,87].

# **3.2.2** Дослідження залежності мінімальної потужності фотоелектричного перетворювача від фрактальної розмірності

Необхідно відзначити, що досліджувані поверхні із площею, менше граничного значення  $S_G < 14.4 \cdot 10^{-3} m^2$ , є нефрактальними, а значить вони не можуть оцінюватися величиною фрактальної розмірності  $d_f$ . Крім того, при значенні величини фрактальної розмірності  $d_f > 2.63$ , отримані значення параметрів  $U_{oc}$ ,  $U_N$ ,  $I_{sc}$ ,  $I_N$  ФЕП, не забезпечують мінімального значення вихідної потужності  $P_{min}$ , величина якої, визначена при виготовленні СЕ.

Тому, установлений робочий діапазон зміни фрактальної розмірності  $2 < d_f$ < 2.63, при якому відбувається зміна величини вихідної потужності від  $P_{max}$  до  $P_{min}$ , як показано на рис. 3.19.



Рис. 3.19. Графік залежності значень величини вихідної потужності *P<sub>V</sub>* від зміни фрактальної розмірності в діапазоні 2 < *d<sub>f</sub>* < 2.63

## 3.2.3 Дослідження залежності вихідних параметрів від реальної площі сприймаючої поверхні фотоелектричного перетворювача

По аналітичних виразах (1.5) і (1.6) моделі з геометричною площею  $S_G$  і (2.8) – (2.14) моделі з реальними площами поверхні  $(S_{REAL}^1; S_{REAL}^2; S_{REAL}^3; S_{REAL}^4)$ , були побудовані ВАХ ФЕП з використання обчислювальної програми MathCAD (рис. 3.20).

У якості вихідних даних використалися параметри ФЕП Ахіота energy P 0,43-D, при паспортних параметрах: температура T = 25 °C; спектр випромінювання AM = 1.5; освітленість поверхні  $E_0 = 1000$  BT/M<sup>2</sup>;  $K_U = -0.1230$ B/K;  $K_I = 0.0032$  A/K і площею  $S_G = 14.4 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>. Оцінки характерних ушкоджуючих дефектів поверхні, у вигляді мікропор і макротріщин, проводилася умовно в діапазоні масштабу вимірів для значень від 0.03 до 3 мкм. У табл. 3.6 показано паспортні та розрахункові параметри ФЕП Ахіота energy P 0,43-D при отриманих різних значеннях реальних площ ( $S_{REAL}^1; S_{REAL}^2; S_{REAL}^3; S_{REAL}^4$ ) поверхонь НПШ ФЕП [40].

## Таблиця 3.6

Паспортні та розрахункові параметри ФЕП при різних значеннях реальних поверхонь

	Фрактальна(пориста, неоднорідна)									
	$S_{c} \cdot 10^{-3} \text{m}^2$		$S_{REAL} (1.10^{-3} \text{m}^2)$							
	d = 2	$S^{1}_{\scriptscriptstyle R\!E\!AL}$	$d_{f1}$	$S^2_{\scriptscriptstyle REAL}$	$d_{f2}$	$S^3_{\scriptscriptstyle REAL}$	$d_{f3}$	$S^4_{\scriptscriptstyle REAL}$	$d_{f4}$	
	14. 400	14.	2.31	14. 394	2.46	14.391	2.54	14.	2.63	
		397						388		
$I_{MPP}(A)$	0.1409	0. 1404		0. 1398		0.1393		0.1387		
$U_{MPP}\left(\mathbf{B}\right)$	0.4706	0.4697		0. 4694		0. 4690		0.4683		
$P_{max}$	3.7037	3. 7021		3. 7013		3.7004		3. 5911		
$U_{oc}\left(\mathrm{B}\right)$	0.6093	0.6084		0. 6079		0.6072		0. 6066		
$I_{sc}(A)$	0.1520	0. 1493		0. 1481		0.1464		0.1473		
$I_{ON}$ (A)	0. 18191 · 10 <sup>-</sup>	0. 1808 · 10 <sup>-8</sup>		0. $1805 \cdot 10^{-8}$		0. 1801·10 <sup>-8</sup>		$0.1798 \cdot 10^{-8}$		
	8									
$I_F(\mathbf{A})$	0.1521	0.1514		0. 1507		0. 1499		0.1493		

Як видно із графіка, приведеного на рис. 3.20, криві ВАХ для реальних площ  $(S_{REAL}^1; S_{REAL}^2; S_{REAL}^3; S_{REAL}^4)$  сприймаючої поверхні, відрізняються від кривої для геометричної топологічної площі  $S_G$ .



Рис. 3.20. Вольт-амперна характеристика ФЕП: для геометричної площі топологічної поверхні  $S_G$  і реальних площах  $(S_{REAL}^1; S_{REAL}^2; S_{REAL}^3; S_{REAL}^4)$  сприймаючої поверхні НПШ ФЕП.

Обчислення по формулі (2.13) показують зниження встановленої вихідної потужності для СЕ на 2.1 % (втрати потужності  $\Delta P = 0.113$  Вт), а, отже, по формулі (3.25), до зменшення ККД СЕ на 1.89 %. Точність побудови ВАХ СЕ підвищилася на 4,2 %.

# 3.3 Обговорення результатів експериментальних досліджень сприймаючої поверхні фотоелектричного перетворювача на основі застосування апарата фрактальної геометрії

Основним результатом даного дослідження є визначення ступеня впливу реальної площі сприймаючої поверхні з ушкоджуючими дефектами на зміну величин вхідних і вихідних параметрів при їх розрахунках у моделях СЕ. Головна особливість полягає в тому, що, як ефективний критерій оцінки розвиненості мікро- і макроструктури шорсткуватого поверхневого напівпровідникового шару ФЕП, обраний і використається кількісний параметр величини фрактальної розмірності.

Робочі поверхні сонячних ФЕП, розглядалися близько до ідеально гладких, з незначними виробничими дефектами, тому для них, як правило, уводилися допущення та обмеження при розрахунках параметрів ФЕП. Це, у свою чергу, викликало часом небажані відхилення від ВАХ реального ФЕП, що спотворювало реальні показники вихідної потужності й ККД ФЕП. Одна із причин таких відхилень ВАХ це певні складності в оцінці якості рельєфу поверхні ФЕП і, особливо, впливу ушкоджуючих дефектів на внутрішню структуру напівпровідникового шару ФЕП. Тому, з огляду на всі складності, пов'язані з визначенням реальних характеристик ФЕП, у ході досліджень, у роботі запропоновано, для вдосконалення моделі ФЕП, увести такий додатковий параметр, ЩО враховує реальну площу сприймаючої поверхні напівпровідникового шару ФЕП. Дану реальну площу активної поверхні запропоновано розраховувати з використання апарата фрактальної геометрії, як для зовнішньої, так і для внутрішньої структури напівпровідникового шару ФЕП, на основі геометричної моделі. Розроблена геометрична модель сприймаючої поверхні ФЕП, якій властиві фрактальні властивості, може бути використана, для оцінки як зовнішньої, так і внутрішньої структури напівпровідникового шару, при розрахунках реальної площі в моделях ФЕП. Крім того, показано, що реальна площа сприймаючої поверхні ФЕП перебуває в ступеневій залежності від величини фрактальної розмірності і відповідає її певному значенню. Отримана вдосконалена модель ФЕП дозволяє більш точно побудувати ВАХ і визначити величину реальної вихідної потужності та ККД для реальної площі поглинаючої поверхні ФЕП. За рахунок запропонованої моделі ФЕП можна побудувати стабільні ВАХ з точністю параметрів, достатніх для проведення інженерних розрахунків, при збірці сонячних модулів, панелей, батарей і в цілому сонячних електростанцій. Основним результатом даного дослідження є визначення ступеня впливу реальної площі сприймаючої поверхні з ушкоджуючими дефектами на зміну величин вхідних і вихідних параметрів при їхніх розрахунках

у моделях СЕ.

Запропонований метод кількісного оцінювання якості параметрів може бути використаний для дослідження швидкості розвитку дефектів у вигляді макро-і мікротріщин за умов утворення кластер-кластерних агрегацій у структурі НПШ ФЕП. Для цього необхідно провести додаткові дослідження та розрахунки часу утворення кластерів, що надалі буде враховуватись при зміні корисної площі у задачах прогнозування обсягів генерування електроенергії СЕС.

### Висновки до третього розділу

Розроблений метод кількісного оцінювання якості параметрів СЕ дозволяє підвищувати точність, стабільність та лінійність вольт-амперної (вольт-ватної) характеристик і визначити реальне значення величини вихідної потужності та ККД СЕ. Отримані аналітичні вирази для обчислення вихідних параметрів, з врахуванням реальних геометричних структурних змін поверхневого шару ФЕП, при наявності ушкоджуючих дефектів в вигляді макро- та мікротріщин и локальних неоднорідностей. Отримані аналітичні вирази дозволяють розрахувати такі параметри СЕ як струм короткого замикання, напругу холостого ходу, максимальну вихідну потужність з урахуванням величини реальної площі сприймаючої поверхні ФЕП.

Експериментально підтверджений кваліметричний метод кількісного оцінювання якості параметрів СБ для систем контролю якості параметрів СБ на СЕС, який дозволяє визначити СБ зі значними пошкодженнями сприймаючої поверхні ФЕП на основі визначення величини фрактальної розмірності різних площ поверней ФЕП, шляхом вимірювання напруги холотого ходу, струму короткого замикання.

Експериментально обгрунтовано вибір величини фрактальної розмірності, для практичного використання, в якості ефективного критерію оцінки ступеня пошкодження сприймаючої поверхні ФЕП.

Експериментально отримано значення величини фрактальної розмірності, при яких сприймаюча поверхня ФЕП ушкоджена, що потребує заміни СБ.

Підтверджено адекватність одержаних теоретичних досліджень щодо вдосконалення аналітичних виразів для кількісної оцінки якості параметрів моделі ФЕП.

Проведений обчислювальний експеримент у системах схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink, який підтвердив вплив геометричних характеристик поверхні на вихідні параметри ФЕП, на основі використання обчислювального апарата фрактальної геометрії. Підтверджені результати

теоретичних досліджень про відповідність величини фрактальної розмірності певному значенню площі, а також про степеневу залежність геометричної топологічної поверхні від величини фрактальної розмірності.

Проведено порівняння теоретичних результатів з результатами практичного експерименту, яке показало розходження отриманих даних до 5 %.

Розроблений та представлений алгоритм побудови математичної моделі СЕ у системах схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink з врахуванням площі активної сприймаючої поверхні ФЕП.

Запропонований метод кількісного оцінювання якості параметрів може бути практично використаний для контролю вхідних та вихідних параметрів СБ на етапі збірки, відбраковування сонячних модулів, панелей та при побудові різних варіантів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій.
### **РОЗДІЛ 4**

# ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДУ КІЛЬКІСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ СЕС

## 4.1 Впровадження розробленого методу кількісного оцінювання якості параметрів сонячної батареї

З метою впровадження методу кількісного оцінювання якості параметрів було розроблено та побудована структурну схема сонячної електростанції, до якої входять наступні елементи (рис.4.1):

- СБ, для перетворення сонячної енергії в електричний струм, які складаються з СЕ, що мають послідовно-паралельне з'єднання, в залежності від кількості СЕ;

- перетворювач постійної напруги, що працює за допомогою контролера точки максимальної потужності;

- акумуляторні батареї, необхідні для накопичення електричної енергії;

- вихідний інвертор, який перетворює постійний струм в зміннийз заданою частотою та напругою;

- з'єднувальні елементи, проводи, кріплення та інше;

- автоматизована система управління та контролю параметрів СБ (АСУ СБ ) СЕС;

- автоматизоване робоче місце оператора (APMo) АСУ СБ СЕС;

- обчислювальний модуль АСУ СБ СЕС.

На рис 4.1 Представлено структурну схему СЕС.



Рис. 4.1. Структурна схема сонячної електростанції

Структурна схема СЕС включає кілька ключових компонентів, які разом забезпечують перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію та її подальше використання. Основні елементи СЕС: СБ, інвертор, акумулятори, лічільник, система моніторингу.

У якості критерію визначення раціонального режиму роботи СБ обрано коефіцієнт, який визначається згідно виразу (4.1):

$$k_{\rm pag} = \frac{E_{\rm piy}}{E_{\rm Mic}},\tag{4.1}$$

де  $E_{\rm piч}$  – середня річна сума сонячної інсоляцію на горизонтальну площину, кВт·год/м<sup>2</sup>;

 $E_{\rm mic}$  – середньомісячна сума сонячної інсоляції на горизонтальну поверхню, найменше протягом року, кВт·год/м<sup>2</sup>.

Даний коефіцієнт характеризує відношення сонячного випромінювання для найменш сонячного дня до випромінювання за весь рік: якщо дане відношення буде більше 50, тоді режим для станції необхідно обрати сезонний, якщо менше 50 – цілорічний.

Вирівнювання добового графіку навантаження за допомогою акумуляторної батареї у години нічних провалів, в години надлишкової генерації СЕС представлено на рис.4.2.

Проведемо моделювання параметрів акумуляторної батареї (АБ), яка входить до складу СЕС.

Для моделювання АБ використано метод, в якому була запропонований модель АБ, заснована на загальному співвідношенні Шеферда і визначається згідно виразу (4.2):

$$V_{bat} = E_0 - R \cdot i - \frac{K \cdot Q}{(Q - \int i dt)} + Aexp(-B \int i dt), \qquad (4.2)$$

де V<sub>batt</sub> - напруга АБ (В);

Е<sub>0</sub> – електро рушійна сила акумулятора;

*R* – внутрішній опір АБ, Ом;

і – струм батареї, А;

К – опір поляризації, Ом;

Q – ємність акумулятора, яку він здатний віддати при розряді (повна ємність акумулятора);

A, B – коефіцієнти, які характеризують величину падіння напруги під час експоненційної зони розряду та зворотну величину ємності АБ в кінці експоненціальної зони розряду (А·год)<sup>-1</sup>;

 $\int i dt - \phi$ актичний рівень заряду АБ, А·год.



Рис. 4.2 – Вирівнювання добового графіку навантаження за допомогою акумуляторної батареї

В моделі АБ величина напруги визначається розрядним струмом та

фактичним рівнем заряду батареї. Таке представлення АБ дозволяє з достатньою точністю виконати моделювання режиму розряду та заряду АБ різних типів, в томучислі ті, що використовують для відновлювальних джерел енергії [5,20,24].

На рис.4.3 представлено типову діаграму розряду АБ, де  $U_{\text{ном}}, U_{\text{ехр}}, U_{\text{повн}}$ номінальні напруги, в кінці експотенційної зони розряду та повністю зарядженої АБ відповідно, В;  $Q_{\text{ехр}}, Q_{\text{end}}$  – ємність АБ в кінціекспотенційної зони розряду та залишкова ємність АБ (А·год).



Рис. 4.3. Характеристика розряду акумуляторної батареї СЕС

На рис. 4.4 наведено імітаційну модель акумуляторної батареї, створену за допомогою систем схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink. На рис. 4.4 видно, що акумуляторна батарея моделюється за допомогою керованого джерела напруги, яке увімкнене послідовно з постійним опором. Модель АБ СЕС виконана у вигляді окремих підсистем [51,69,79,81].



Рис. 4.4. Імітаційна модель акумуляторної батареї СЕС

В моделі АБ СЕС використано два типи силових напівпровідникових перетворювачів: постійної напруги та інвертор. З метою дослідження СЕС обрані спрощені моделі перетворювачів на базі ідеальних джерел струму та напруги.

Модель вхідного інвертора, яка представлена на рис.4.5, побудована на ідеальному джерелі постійної напруги, що під'єднано до силових виводів (O<sub>ut1</sub>, O<sub>ut2</sub>) шляхом послідовного активного опору  $R_{inv}$ , який враховує внутрішні втрати в інверторі. Вимірювальні трансформатори струму та напруги забезпечують розрахунок спожитої активної потужності та розраховують діючі значення струму. Для врахування втрат укабелі з'єднання до моделі включений опір  $R_{pr}$ . Модель перетворювача постійної напруги побудована аналогічним чином.



Рис. 4.5. Імітаційна модель інвертора СЕС

Розглянемо модель електричного навантаження СЕС. В якості моделі зміни навантаження прийнято імовірнісна-статистичнамодель, що визначається згідно виразу (4.3):

$$P_{pi} = P_i + \beta \sigma(P_i), \tag{4.3}$$

де  $P_{pi}$ ,  $\overline{P}_i$  – розрахункове активне навантаження та математичне очікування навантаження в *i*-ту годину;

 $\beta$  – коефіцієнт надійності розрахунку, який визначає імовірність того, що випадкове навантаження буде меншим розрахункового значення. В розрахунках прийнято нормальний закон розподілення навантаження, отже значення  $\beta = 3$ ;

 $\sigma(P_i)$  – середньоквадратичне відхилення для *i*-тої сходинки добового графіку.

Імітаційна модель навантаження розроблена на базі керованого джерела струму (рис. 4.6).

Вхідним параметром моделі є величина вихідної напруги інвертора, а вихідними – струм та напруга на системі збірних шин споживача.



Рис. 4.6. Імітаційна модель навантаження СЕС

З метою контроля вихідних параметрів СБ СЕС у схему моделі включено вимірювальний порт m, який представлений на рис 4.7, який забезпечує вимірювання поточних значень струму.

Таким чином, проведено моделювання усіх елементів, які входять до складу СЕС, що дозволяє проводити контроль параметрів СБ СЕС з використанням методу кількісного оцінювання якості параметрів.

4.2 Удосконалення методики розрахунку потужності сонячної електростанції для резервування споживачів власних потреб Харківської ТЕЦ-5

Розглянемо етапи методики розрахунку потужності сонячної електростанції для резервування споживачів власних потреб Харківської ТЕЦ-5.

Першим етапом, необхідно знайти сумарну потужність електричної енергії для резервування споживачів власних потреб Харківської ТЕЦ-5, яка буде отримана з збудованої СЕС.

Другим етапом необхідно визначити кількість СБ, які повинні резервувати встановлену потужність споживачів власних потреб Харківської ТЕЦ-5.

На третьому етапі необхідно розрахувати кількість елементів СЕС

(інвертор, АК, контролери заряду/розряду батареї, проводи, кріплення, тощо)

Для розрахунку CEC були вибрані сонячні панелі типу LP Longi Solar Half-Cell 700W, параметри яких представлені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Найменування параметру	Параметр			
Тип кристалу	Монокристал, 210х105мм			
Максимальна потужність	700 Вт			
Напруга при максимальній потужності	40,723 B			
Струм при максимальній потужності	17,20 A			
Напруга холостого ходу	48,86 B			
Струм короткого замикання	17,97A			
ккд	22,54 %			
Робоча температура	-40 °C – +85 °C			
Максимальна напруга ланцюга	1500 B			
Кількість фотоелементів	132			
Габаритні розміри	2384х1303х35 мм			

Параметри сонячної батареї типу LP Longi Solar Half-Cell 700W

Розрахунок проведемо для координат 50°02' північної широти, 36°15' східної довготи (Україна, Харків, Харківська область).

Розрахуємо кількість електроенергії, яка виробляє СЕС за добу. Кількість електричної енергії, що виробляється за добу фотоелектричною станцією визначається згідно виразу (4.4):

$$W_{\rm go6} = P_{\rm B.fl.} \cdot T, \tag{4.4}$$

де Р<sub>в.п.</sub>- активна потужність споживачів власних потреб ТЕЦ, кВт;

Т- час роботи споживачів власних потреб ТЕЦ, год.

Перелік споживачів власних потреб блоку № 3 потужністю 300 МВт Харківської ТЕЦ-5 представлено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2.

## Навантаження споживачів власних потреб блоку № 3 потужністю 300 МВт

№ п/п	Найменування споживача	Потужність , кВт
	2	4
1.	Насос конденсатний мережевого підігрівача КНБ-3Г	250
2.	Насос бустерний БПН-ЗА	500
3.	Насос конденсатний мережевого підігрівача КНБ-ЗА	250
4.	Насос технічної води НТВ-ЗА	400
5.	Живильний електронасос ПЕН-3	8000
6.	Насос конденсатний мережевого підігрівача КНБ-3В	250
7.	Насос ОК-3Б	200
8.	Насос бустерний-3В	500
9.	Насос конденсатний КЕН-3Б	320
10.	Насос бустерний БПН-3Б	500
11.	Насос конденсатний мережевого підігрівача КНБ-3Д	250
12.	Насос ТВ-3Б	400
13.	Насос конденсатний мережевого підігрівача КНБ-3Б	250
14.	Насос конденсатний КЕН-ЗА	320
15.	Димосос рециркуляції димових газів ДРГ-3А	800
16.	Hacoc циркуляційний ЦЕН-2А	1600
17.	Вентилятор дутьовий II швидкість ДВ-ЗА II ск .	1600
18.	Вентилятор дутьовий I швидкість ДВ-ЗА І ск.	685
19.	Димосос осьового типу ДС-3А	1700
20.	Hacoc TB-3B	400
21.	Вентилятор дутьовий II швидкість ДВ-3Б II ск .	1600
22.	Вентилятор дутьовий I швидкість ДВ-3Б І ск.	685
23.	Насос циркуляційний ЦЕН-2Б	1600
24.	Димосос рециркуляції димових газів ДРГ-3Б	800
25.	Насос конденсатний КЕН-3В	320
26.	Димосос осьового типу ДС-3Б	1700
	Усого енергоблок 300 МВт	25880 кВт

ТЕЦ

Кількість електричної енергії, що виробляється за рік фотоелектричною станцією, визначається згідно виразу (4.5)

$$\mathbf{E}_{\mathrm{rog}} = \sum_{1}^{365} W_i \cdot S \cdot \eta_{inv},\tag{4.5}$$

де W<sub>i</sub> – енергія, вироблена з 1 м<sup>2</sup> поверхні під нахилом за один день; S – загальна ефективна площа сонячної станції; η<sub>inv</sub> – ККД сонячної батареї.

Загальна ефективна площа сонячної станції визначається згідно виразу (4.6):

$$S = N_m \cdot N_c \cdot S_c, \tag{4.6}$$

де N<sub>m</sub> – кількість сонячних модулів в станції;

N<sub>c</sub> – кількість СЕ на одному модулі, для вибраної моделі панелей дорівнює 60;

 $S_c$  – площа одного CE, м<sup>2</sup>

Енергія, вироблена за 1 день з 1 м<sup>2</sup> похилої поверхні, визначається згідно виразу (4.7):

$$W_i = E_i \cdot \eta_m, \tag{4.7}$$

де E<sub>i</sub> – сонячна енергія, що падає на 1 м<sup>2</sup> похилої поверхні за один день;  $\eta_{\rm m}$  – ККД сонячної панелі.

Сонячна інсоляція на 1 м<sup>2</sup> похилій поверхні визначається згідно виразу (4.8):

$$E_i = \frac{E_{\text{rop}}}{\sin \alpha_i} \cdot \sin(\alpha_i + \beta), \qquad (4.8)$$

де Е<sub>гор</sub> – сонячна енергія, що отримується за добу на 1м<sup>2</sup> горизонтальної поверхні,

α<sub>i</sub> - кут висоти Сонця,

β - кут нахилу сонячної панелі.

База даних про середньодобову інсоляцію для кожного дня в році сформована на підставі інформації, отриманою з сайту НАСА, шляхом усереднювання за 30 років. Дані, на підставі яких ведеться розрахунок, приведені в таблиці В.1. додатку В.

Результати розрахунку сонячної енергії, що падає на 1 м<sup>2</sup> похилої поверхні під кутом 48° зведені в таблицях Б.1. - Б.2. додатку Б.

В таблиці Б.3. додатку Б приведений фрагмент даних про енергію, що виробляється з 1 м<sup>2</sup> похилої поверхні з урахуванням ККД СБ.

Кількість енергії, що виробляється з усієї фотоелектричної станції, розраховується згідно виразу (4.9):

$$E_{\mathrm{d}} = W_i \cdot S, \tag{4.9}$$

де W<sub>i</sub> – енергія, вироблена з 1 м<sup>2</sup> поверхні під нахилом за один день; S – загальна ефективна площа сонячної станції.

Для точної оцінки кількості енергії, що виробляється фотоелектричною станцією, необхідно врахувати можливі втрати в провіднику. Приймемо їх рівними 1 %. Також необхідно врахувати ККД інвертора, який дозволить перетворити рід струму з постійного в змінний, для подальшого підключення до мережі.

Виберемо інвертор марки SMA Sunny Boy 9000TL U - 208. Основні технічні параметри інвертора представлені в табл. 4.3.

121

Назва параметру	Значення параметру		
Номінальна потужність	9000 Вт		
Максимальна напруга на вході	600 B		
Максимальний струм на вході	31 A		
Номінальна напруга на виході	183 – 229 B		
Максимальний вихідний струм	43,3 A		
Коефіцієнт потужності	1		
ккд	98 %		

Основні технічні параметри інвертора SMA Sunny Boy 9000TL U - 208.

Денна генерація електричної енергії сонячною станцією з урахуванням втрат в провіднику і ККД інвертора визначається згідно виразу (4.10):

$$\mathbf{E}_{\mathrm{дehb}} = 0,99 \cdot E_{\mathrm{d}} \cdot \eta_{\mathrm{ihb}} , \qquad (4.10)$$

де Е<sub>д</sub> – кількість енергії, що виробляється з усієї фотоелектричної станції кВт·г;

*η*<sub>інв</sub> – ККД інвертора.

Результат розрахунку вироблення електроенергії та вартість обладнання СЕС для споживачів власних потреб блоку 300 МВт Харківської ТЕЦ № 5 представлені в табл. 4.4.-4.5

122

Результат розрахунку вироблення електроенергії СЕС для споживачів власних

Параметр	Значення параметру		
Потужність споживачів власних потреб блоку № 3 ТЕЦ-5	<i>Р</i> <sub>в.п.</sub> =25, 88 10 <sup>6</sup> Вт		
Кількість електричної енергії, що виробляється за добу фотоелектричною станцією	$W_{\text{добу}} = 621,12\ 10^6\ \mathrm{Bt}$ год.		
Кількість електричної енергії, що виробляється за 1 годину фотоелектричною станцією	$W_{\rm год} = 25,88 \ 10^6 \ {\rm Bt} \cdot {\rm год}.$		
Площа одного CE, м <sup>2</sup>	S <sub>c</sub> =0,04305 м <sup>2</sup>		
Площа одного сонячного модуля	$S_c = 3,10 \text{ m}^2$		
Кількість СБ в станції:	N <sub>m</sub> = 36971 модулів		
Загальна ефективна площу сонячної електростанції при роботі протягом 1 години	$S = 210\ 093\ (\mathrm{m}^2)$		
Кількість електричної енергії, що виробляється 1м <sup>2</sup> сонячної панелі кожен день	$W_{\rm i} = 2150, 5 \cdot 0, 2254 = 484, 7 \; ({\rm Bt} \cdot {\rm r})$		
Кількість енергії, що виробляється з усієї фотоелектричної станції	$E_{\pi} = 101 832  \text{\kappa}\text{Bt} \cdot \text{r}.$		
Денна генерація електричної енергії сонячною станцією з урахуванням втрат в провіднику і ККД інвертора	$E_{\rm день} = 98\ 797\ (кBT \cdot \Gamma).$		

# потреб блоку 300МВт Харківської ТЕЦ № 5

## Таблиця 4.5

	enneoke	лектрооолиднинн	n iu noro np	nojinjila ba	
N⁰	Найменування	_	Кількість,	Ціна за шт.,	Dongiony pay
п/п	блоку	Елементи	ШТ.	грн	Бартість, грн
1.	Блок сонячних модулів	Фотоелектричний модуль LP Longi Solar Half-Cell 700W	36971	8289	296 033 346
2.	Інвертор	МАП Рго 24В, 100кВт	259	242403	60 600 750
	Всього				356 634 096

## Список електрообладнання та його приблизна вартість

В табл. 4.5 показана орієнтовна вартість основного обладнання СЕС для споживачів власних потреб блоку 300 МВт Харківської ТЕЦ № 5.

4.3 Розробка системи безперервного моніторингу якості параметрів сонячної батареї для оператора АРМо АСУ СЕС

Система безперервного моніторингу параметрів СБ призначена для моніторингу мережі постійного струму СБ, необхідна для автоматизації сонячних електростанцій.

Система складається з обчислювального модулю ПТК АСУ ТП СБ, модуля збору даних та датчика контролю параметрів СБ (рис.4.7).

Для визначення значення параметрів ЕОМ обчислювального модулю АСУ СБ виконує дві операції:

<u>Обчислювальна операція № 1</u>. Для знаходження СБ з пошкодженнями сприймаючої поверхні СБ, програмні засоби (ПЗ) обчислювального модулю АСУ СБ, опитують модуль збору даних про параметри СБ. На модуль збору даних про параметри СБ, передається інформація з датчика контролю параметрів про поточні параметри СБ.

<u>Обчислювальна операція № 2</u>.

У обчислювальному модулю АСУ СБ знаходиться інформація:

- про параметри СБ, які вказує виробник СБ по кожній СБ;

- про величину фрактальної розмірності по кожному параметру СБ згідно аналітичних виразів (2.8-2.13).

Обчислювальний модуль АСУ СБ визначає параметри СБ, при яких ушкодження на сприймаючій поверхні ФЕП відсутні, а також параметри СБ, при яких відбувається ушкодження сприймаючої поверхні ФЕП. Потім система порівнює поточні значення, отримані в режимі реального часу з датчиків контролю параметрів СБ, які встановлені на СБ, з еталонними значенями параметрів фрактальної розмірності, отриманими в результаті розрахунків. При виявлені пошкоджень видається інформація про стан сприймаючої поверхні ФЕП кожної СБ оператору АРМо сонячної станції.



Рис 4.7. Схема побудови автоматизованої системи управління і контролю параметрів сонячної батареї

Обчислення показань фрактальної розмірності по всім площам сприймаючої поверхні ФЕП СБ, з використанням окремого вимірювального каналу датчика контролю параметрів СБ, проводиться відповідно до виразу (4.11):

$$Y = (X - X_0) \cdot C_1 , \qquad (4.11)$$

де C<sub>1</sub> = 0,001 – постійний коефіцієнт, що переводить показання вимірювальних аналізаторів у параметри СБ: струм короткого замикання, напруги холостого ходу та інші;

 X<sub>0</sub> – постійний коефіцієнт, пов'язаний з розташуванням вимірювального каналу на поверхні ФЕП і визначається при калібруванні;

 X – поточні показання вимірювального каналу датчика контролю параметрів СБ.

# Особливості системи безперервного моніторингу параметрів сонячної батареї:

 конструкція приладу поєднує блок живлення та моніторинг постійного струму;

- цілком оптимізована конструкція обладнання, оптично ізольована від будь-яких зовнішніх електричних з'єднань;

 конструкція системи має незалежну від процесора схему підключення та функцію самодіагностики, забезпечуючи тим самим безаварійну роботу приладу;

- технологія цифрової фільтрації використовується для ефективної боротьби із зовнішніми перешкодами, а суміщена конструкція зручна для встановлення.

Метрологічна атестація методики вимірювання пошкодження поверхні ФЕП

Визначення похибки результату вимірювання окремим датчиком вимірювання (системи контролю пошкодження поверні ФЕП. Похибка результату вимірювання окремим вимірювальним датчиком на СБ, розраховують згідно з виразом (4.12):

$$\Delta h = \sqrt{(\Delta x_0)^2 + (\Delta x)^2 + (\Delta_{con})^2}$$
(4.12)

де  $\Delta x_0$  – похибка визначення величини коефіцієнта  $x_0$ ;

 $\Delta x$  – похибка виміру величини *x*, мкм;

Δ<sub>con</sub>– похибка стандартного зразка значення товщини поверхневого шару ФЕП, що використовується при калібруванні вимірювального датчика, мкм

Визначення похибки результату виміру товщини поверхневого шару ФЕП . Похибка результату вимірювання товщини поверхневого шару ФЕП розраховують на підставі рівняння (4.12) і визначається виразом (4.13):

$$\Delta h = \sqrt{(\Delta h_1)^2 + (\Delta h_2)^2 + (\Delta h_3)^2 + (\Delta h_4)^2 + (\Delta h_5)^2} \quad (4.13)$$

де що  $\Delta h_1$ ,  $\Delta h_2$ ,  $\Delta h_3$ ,  $\Delta h_4$ ,  $\Delta h_5$  – похибки результатів вимірювання датчиками вимірювальних каналів модуля АСУТП СЕС дорівнює від 1 до 3 мкм

Визначення похибки вимірювання товщини поверхневого шару ФЕП. Похибка вимірювання товщини поверхневого шару ФЕП, розраховується в модулі АСУ СЕС на підставі рівняння (4.13), згідно з виразом (4.14):

$$h_{\Phi \in \Pi} = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (\Delta h_i)^2}$$
(4.14)

127

де  $h_i$  – похибка вимірювання товщини поверхневого шару ФЕП мкм; n – число шарів (5 шарів )

(при п'яти шарах (n=5), було отримано значення похибки вимірювання ефективної висоти CE – *h*  $_{\Phi E\Pi}$ = 2 мкм), похибка допустима

Визначення похибки вимірювання товщини поверхневого шару ФЕП. Похибка вимірювання товщини поверхневого шару ФЕП, розраховується на підставі рівняння (4.14) згідно з виразом (4.15):

$$\Delta_{ov} = \sqrt{(\Delta h_{max})^2 + (\Delta h_{min})^2}$$
(4.15)

де *h* <sub>max</sub> – похибка вимірювання максимальної товщини поверхневого шару ФЕП, мкм;

*h* <sub>min</sub> – похибка вимірювання мінімальної товщини поверхневого шару ФЕП, мкм.

### Висновки до четвертого розділу

Впроваджено практичні рекомендації щодо використання методу кількісного оцінювання якості параметрів СБ СЕС

У розділі отримано наступні результати:

1. Розроблена система безперервного моніторингу якості параметрів сонячної батареї, що дозволяє оператору АРМо АСУ СЕС приймати управлінські рішення на переведення СЕС в режимі функціонування.

2. Вдосконалена методика розрахунку потужності сонячної електростанції, що дозволило резервування споживачів власних потреб Харківської ТЕЦ № 5.

3. Для визначення ушкоджуючих дефектів у сприймаючій поверхні ФЕП, запропоновано застосовувати спеціальний інформаційно-обчислювальний модуль визначення дефектів у складі програмно-апаратних засобів системи АСУ СЕС.

4. Розроблені та запропоновані етапи алгоритму методу кількісного оцінювання якості параметрів, в яких визначено послідовність виконання вимірювальних та обчислювальних операцій з розрахунку показників фрактальної розмірності для встановлення СБ з значними пошкодженнями сприймаючої поверхні ФЕП.

5. Запропоновано методику вимірювання параметрів СБ, із застосуванням вимірювальних датчиків контролю параметрів СБ для виявлення пошкодження сприймаючої поверхні ФЕП. Для проведення метрологічної атестації методики вимірювань параметрів СБ, із застосуванням вимірювальних датчиків стану СБ, була запропонована структурна схема моніторингу якості параметрів СБ.

#### ВИСНОВКИ

Дослідження виконані з урахуванням сучасного стану вивченості проблеми впливу геометричних властивостей мікро- і макро шорсткості напівпровідникових матеріалів на фізико-хімічні процеси перетворення фотоструму в електричний струм на сприймаючій поверхні ФЕП.

Виконано аналіз фізичних процесів ушкоджуючих дефектів, у структурі сприймаючої поверхні ФЕП, викликаними зовнішніми й внутрішніми факторами, що показав їхній вплив на:

 – зниження величини вихідної потужності й коефіцієнту корисної дії при тривалій експлуатації;

 – зміна паспортних характеристик, наданих виробником і, як наслідок, невідповідність реальним ВАХ і ВВХ, через деякий ступінь наближеності, з урахуванням допущень про стан реальної поверхні ФЕП;

– зміна ступеня заповнення ВАХ для встановленого ККД.

Запропонований новий підхід для вивчення фізичних процесів у структурі сприймаючої поверхні ФЕП, на основі апарата фрактальной геометрії, що враховує ушкоджуючі дефекти при розрахунку номінальної потужності та ККД СБ.

Побудовано геометричну модель рельєфу сприймаючої поверхні, що враховує в структурі напівпровідникового шару ФЕП наявність локальних неоднородностей, мікропор і макротріщин, що впливають на величину робочої площі ΦΕΠ. Показано, що такі структури володіють фрактальними властивостями й характеризуються кількісною величиною фрактальної розмірністі. На основі застосування апарата фрактальної геометрії була визначена реальна площа сприймаючої активної поверхні ФЕП, що перебуває в степеневій залежності від фрактальної розмірності й відповідає її певному значенню. Теоретично й експериментально обґрунтований вибір параметра фрактальної розмірності як ефективний критерій оцінки розвиненості мікро- і макроструктури сприймаючого поверхневого шару ФЕП.

В роботі були удосконалені аналітичні вирази моделі кількісної оцінки якості параметрів сонячного елемента, що дозволило враховати степеневу залежність реальної площі сприймаючої поверхні від зміни величини фрактальної розмірності об'ємній структурі всій В по товщині напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача. Цe було реалізовано в аналітичних виразах

Запропоновано використання параметра фрактальної розмірності стосовно до завдань розрахунку величини реальної вихідної потужності й ККД ФЕП. Показано перевагу використання методу кількісного оцінювання якості параметрів для побудови фрактальних поверхонь перед класичними моделями негладких форм, як для повного опису геометрії поверхневого шару ФЕП, так і для подальшого розрахунку параметрів СЕ. Побудова моделі поверхні з використанням фрактальних принципів, обґрунтована теоретично, підтверджена експериментально й покладена в основу дослідження впливу геометрії мікро- і макроструктури поверхні на фізичні властивості досліджуваних матеріалів поверхневого шару ФЕП. Результати проведеного аналізу показують, що метод кількісного оцінювання якості параметрів, заснований на теорії фракталов, дає можливість оцінки характерних ушкоджуючих дефектів у діапазоні значень від 0,03 до 3 мкм.

При виконанні дисертаційної роботи отримані такі наукові результати:

1. Вперше розроблена геометрична модель сприймаючої поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача, в якій розглянуті фізичні процеси, котрі відбуваються, при зміні властивостей зовнішньої та внутрішньої структури сприймаючої фрактальної поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача за наявності локальних неоднорідностей, мікропор і макротріщин, що дозволяє врахувати точність вимірювання електрофізичних параметрів: струму короткого замикання, напруги холостого ходу, величини вихідної потужності та коефіцієнту корисної дії, шляхом урахування зміни величини площі сприймаючої поверхні на основі використання апарату фрактальної геометрії.

2. Набули подальшого розвитку вдосконалені аналітичні вирази для кількісної оцінки якості параметрів моделі фотоелектричного перетворювача, які на відміну від відомих дозволяють врахувати степеневу залежність реальної площі сприймаючої поверхні, від зміни величини фрактальної розмірності в об'ємній структурі по всій товщині напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача.

3. Розроблений метод кількісного оцінювання якості параметрів сонячного елемента, який, на відміну від відомих, дозволив підвищити точність, стабільність та лінійність вольт-амперної (вольт-ватної) характеристик на основі вимірювання величини фрактальної розмірності, що характеризує зміну властивостей структури реальної площі сприймаючої поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача, що призводить до зміни вихідної потужності та коефіцієнту корисної дії.

Удосконалено модель ФЕП, для розрахунку вихідних параметрів з урахуванням робочої площі реальної сприймаючої поверхні, що дозволяє підвищувати точність, стабільність ВАХ і визначати реальне значення величини вихідної потужності й ККД ФЕП. Отримано й запропоновані вдосконалені аналітичні вирази для обчислення вихідних параметрів, з врахуванням реальних геометричних структурних змін поверхневого шару ФЕП, при наявності ушкоджуючих дефектів. Отримані аналітичні вирази вдосконаленої моделі ФЕП, що дозволили також розрахувати та уточнити вхідні параметри (струм короткого замикання, напруга холостого ходу, максимальна вихідна потужність), які відмінні від установлених заводських значень. Для підтвердження адекватності отриманої моделі був застосований обчислювальний експеримент, що підтвердив відповідними розрахунками результати теоретичних досліджень і висновків.

Практичним обчислювальним експериментом підтверджений вплив геометричних характеристик поверхні на вихідні параметри ФЕП, на основі використання методу кількісного оцінювання якості параметрів. Підтверджено результати теоретичних досліджень про відповідність величини фрактальної розмірності певному значенню площі, а також про степеневу залежність геометричної топологічної поверхні від величини фрактальної розмірності. Показано, що при збільшенні шорсткості й пористості через ушкоджуючі дефекти, спостерігається зменшення реальної площі поверхневого напівпровідникового шару при зміні фрактальної розмірності в інтервалі від 2.31 до 2.63. Це, у свою чергу, впливає на величину струму й напруги навантаження, що приводить до перекручування ВАХ і зниженню вихідної потужності на 1.49-2.1 % і зменшенню ККД від 2 до 3 %.

Експериментально підтверджено, що фрактальні моделі, дозволяють спростити й удешевити розрахунок таких фізичних величин, як вихідна потужність і ККД ФЕП, за рахунок етапу безпосереднього дослідження геометричних характеристик реальної поверхні. Створена вдосконалена модель, яка може бути практично використана для контролю вхідних, вихідних параметрів ФЕП на етапі збірки, відбраковування сонячних модулів, панелей, батарей і сонячних станцій, по відповідних необхідних характеристиках. Таким чином, мета та поставлені задачі, в результаті теоретичних та практичних досліджень, виконані.

#### ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андронова O.B. B.B. Н.Л. роботи Курак, Моделювання фотоелектричних панелей з використанням середовища MATLAB/Simulink / Вісник ХНТУ. 2021. № 3(78). C. 11-19. DOI: Дон. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.3.1

2. Андронова О.В., Курак В.В., Дон Н.Л. Моделювання роботи фотоелектричних панелей з використанням середовища MATLAB/Simulink. Вісник ХНТУ 2021. № 3(78). С. 11-19. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.3.1.

3. Буданов П. Ф., Грінченко Г. С., Нечуйвітер О. П., Цихановська І. В. Методологічні підходи для оцінювання якості багатопараметричних об'єктів енергетики. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2023. № 1 (15). С. 27-35. DOI: https://doi.org/10.20998/2413-4295.2023.01.04. URL: http://vestnik2079-5459.khpi.edu.ua/article/view/274685

4. Буданов П. Ф., Кононов В. Б., Мельников В. Є. Методи контролю та оцінки якості параметрів сонячних елементів. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2024. № 6. С. 78-86. DOI: https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-177-6-78-86
 URL:

https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/3135

5. Буданов П.Ф., Бойко Т.Г., Грінченко Г.С., Нечуйвітер О.П., Цихановська І.В., Застосування методів кваліметрії для оцінки комплексних показників якості багатопараметричних об'єктів. Машинобудування. 2022. №30. С. 73-84. DOI: https://doi.org/ 10.32820/2079-1747-2022-30-73-84 URL: https://jmash.uipa.edu.ua/index.php/jMASH/article/view/299/223

6. Буджак Я.С., Єрохов В.Ю., Мельник І.І. Прогнозування і розрахунок фотоелектричного перетворювача із заданими характеристиками Східноєвропейський журнал передових технологій. 2011. № 4/8(52).С. 24-29.

7. Гаєвський, О. Ю., Іванчук В. Ю. «Моделювання вольт-амперної

характеристики фотоелектричного модуля зі змінними фактором ідеальності та зворотним струмом насичення,» Відновлювана енергетика, 2024. №3(78). с. 54-61. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78)54-61.

8. Глушко, О. В.; Степенко, С. А. Параметри, характеристики і фактори, що впливають на ефективність та надійність роботи фотоелектричних перетворювачів у складі електроенергетичних систем. Технічні науки та технології. 2021. № 1(23). С. 249-264.

9. Дядюра К. О., Пономаренко О. М. Особливості методів оцінювання параметрів сонячних елементів. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2024. № 6. С. 87–93. DOI: https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-177-6-87-93 URL: https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/3136

10. Зайцев Р. В., Кіріченко М. В., Мінакова К. О., Дроздов А. М. «Підвищення ефективності промислових зразків кремнієвих сонячних елементів,» Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність, 2021. № 2(3). с. 75-83.

11. Карпчук Г. Л., Будько В. І. Аналіз технологій фотоелектричного перетворення сонячного випромінювання на електричну енергію. Відновлювана енергетика. 2023. № 2(73). С. 32–38. DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.2(73).32-38

12. Кирисов І. Г., Буданов П. Ф. Методи досліджень поглинаючої поверхні сонячних елементів Збірник наукових праць «Машинобудування». УША. 2022.
 № 29. С. 104–117. https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-29-104-117.

*13*. Кирисов І. Г., Хом'як Е. А., Буданов П. Ф., Бровко К. Ю. Підходи та вимоги до моделювання структури напівпровідникового шару сонячного елемента. Вісник ВПІ. 2022. Вип. 1. С. 35–38. https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-160-1-35-38.

14. Кривда В., Василенко О., Федорова М. «Моделювання електричних характеристик сонячної панелі,» Електротехніка та комп'ютерні системи, 2017. №26(102). С. 25-31.

15. Кожем'яко, В. П., Домбровський, В. Г., Жердецький, В. Ф.,

Маліновський, В. І., & Притуляк, Г. В.. Аналітичний огляд сучасних технологій фотоелектричних перетворювачів для сонячної енергетики. Оптико-електронні пристрої та компоненти в лазерних і енергетичних технологіях. 2011. С.141-157

16. Курак В.В. Експериментальне визначення потоку сонячного випромінювання із застосуванням паспортних параметрів модуля фотоелектричних перетворювачів/ В.В. Курак, О.В. Андронова. Вісник ХНТУ. 2021. No 1(76). С. 35-42. DOI: https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.1.4 Режим доступу: https://eclass.duth.gr/modules/

17. Курак В.В., Андронова О.В. «Експериментальне визначення потоку сонячного випромінювання із застосуванням паспортних параметрів модуля фотоелектричних перетворювачів,» Вісник ХНТУ, 2021. № 1(76). С. 35-42.

18. Мартинюк В. І., Клен К. С., Жуйков В. Я. «Визначення параметрів схем заміщення сонячних панелей за експериментальними даними,» Мікросистеми, електроніка та акустика, № 26(2). с.237316-1. 2021.

19. Мельников В. Є. Дослідження характеристик сонячного елемента при пошкодженні поверхні фотоелектричного модуля. Машинобудування. 2023. №32. С. 72-79. DOI: https://doi.org/10.32820/2079-1747-2023-32-72-79 URL: https://jmash.uipa.edu.ua/index.php/jMASH/article/view/314/239

20. Микийчук М.М., Рудик Ю.І., Христич В.П., Андрієць В. В., Бондар Д. Ю., Ромашкін Д. Д. Кваліметричний метод оцінювання процесів системи управління якістю підприємства. Метрологія та прилади. №2. С. 44-29.

 DOI:
 https://doi.org/
 10.30837/2663-9564.2024.2.09,
 URL:

 https://mi.nure.ua/article/view/316280/3080554.
 URL:
 URL:

21. Мороз В. І.; Турич О. В. Компьютерне моделювання сонячних батарей,» Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи, 2012. № 736. с. 104-108.

22. Новицький, С. В.; Зур'ян, О. В. Фотоелектричні перетворювачі. Види, ефективність. Вісник Херсонського національного технічного університету, 2024. 1 (88). 92-102.

23. Опанасюк А. С., Курбатов Д. І., Берестюк Т. О., Доброжан О. А.,

Лопатка Р. В. Моделювання основних характеристик сонячних елементів на основі гетеропереходів n-ZnS/p-CdTe і n-CdS/p-CdTe,» Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях, 2013. № 18. с. 149–155.

24. Рудик Ю. І., Тріщ Г. М., Катрич О. О., Хімічева А. І., Малахов І. М., Тимофєєв О. П. Оцінювання якості та прогнозування ризиків процесів системи управління підприємств кваліметричними методами. Машинобудування. 2024. №33. С. 92–101. DOI: https://doi.org/10.32820/2079-1747-2024-33-92-101 URL: https://jmash.uipa.edu.ua/index.php/jMASH/article/view/326/251

25. Руденко Д. В., Васюченко П. В. Моделювання фізичних процесів роботи сонячних фотоелектричних батарей / Д. В. Руденко, // Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2019. Том 30(69), № 2. С. 42–47.

26. Слабінога М.О., Кучірка Ю.М., Криницький О.С., Юрків Н.М. «Моделювання залежності зміни потужності сонячних панелей від кута падіння променів,» Методи та прилади контролю якості, 2018.№ 2(41). с. 18–24.

27. Чернюк А. М., Кирисов І. Г. Качанов Є. І. Засоби забезпечення процесу генерації та споживання електричної енергії в електроенергетичних системах з розподіленою генерацією з урахуванням фактору невизначеності погодних та кліматичних умов. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність : зб. наук. пр. / Нац.тех. ун-т «Харків. політехн. ін.-т». – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. № 1. С. 95–99.

28. Чернюк А.М., Кирисов І. Г., Сук І.В., Карлова О.М., Білоус І.О. Аналіз технологічних схем генерації електроенергії альтернативними джерелами енергії Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2019. Том 30(69). № 4. С. 33–41.

29. Чернюк А.М., Кирисов І. Г., Черевик Ю.О. Аналіз перспектив розвитку систем розподіленої генерації електроенергії в Україні. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія:

Технічні науки. 2021. Том 32 (71). № 3. С. 239–246.

30. Чернюк А.М., Кирисов І. Г., Черевик Ю.О. Особливості технологічних схем генерації електроенергії альтернативними джерелами енергії. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Випуск 204 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків: ХНТУСГ. 2019. С. 66–68.

*31*. Ahmad A. A simple method to extract the parameters of the single-diode model of a PV system // Turkish Journal of Physics. 2013. V 37. P. 121-131.

32. Atia, D. M., Hassan, A. A., El-Madany, H. T., Eliwa, A. Y., & Zahran, M.B. Degradation and energy performance evaluation of mono-crystalline photovoltaic modules in Egypt. Scientific Reports, 2023. 13(1), 13066.

*33.* Bdour, M., & Al-Sadi, A. (). Analysis of different microcracks shapes and the effect of each shape on performance of PV modules. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020, June Vol. 876, No. 1, p. 012005. IOP Publishing.

*34*. Bdour, M., Al-Sadi, A.. Analysis of different microcracks shapes and the effect of each shape on performance of PV modules. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020. Vol. 876, No. 1, p. 012005.

35. Bdour, M., Dalala, Z., Al-Addous, M., Radaideh, A., & Al-Sadi, A. (). A comprehensive evaluation on types of microcracks and possible effects on power degradation in photovoltaic solar panels. Sustainability, 2020. 12(16), 6416.

*36.* Bdour, M., Dalala, Z., Al-Addous, M., Radaideh, A., & Al-Sadi, A. A comprehensive evaluation on types of microcracks and possible effects on power degradation in photovoltaic solar panels. Sustainability, 2020. 12(16), 6416.

37. Berardone, I., Corrado, M., & Paggi, M. (). A generalized electric model for mono and polycrystalline silicon in the presence of cracks and random defects. Energy Procedia, 2014. 55, 22-29.

*38.* Kyrysov I.,Budanov P., Khomiak E., Brovko K., Kalnoy S., Karpenko O. Building a model of damage to the fractal structure of the shell of the fuel element of

a nuclear reactor. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 4, № 8(118).P. 60–70. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263374

*39*. Kyrysov I.,Budanov P., Qualimetric method of quality assessmentof solar battery parameters. Збірник наукових праць «Машинобудування». УША. 2024. № 33. С. 64–77. https://doi.org/10.32820/2079-1747-2024-33-64-77

40. Kyrysov I., Budanov P., Brovko K., Rudenko D., Vasiuchenko, P., Nosyk,
A. Development of a solar element model using the method of fractal geometry theory
Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021 Vol. 3, no. 8(111). P. 75–
89. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235882

*41.* Budanov P., Kupriyanov O., Melnykov V., Kononov V. Qualimetric method for assessing quantitative and qualitative parameters of a solar cell. Машинобудування. 2024. Вип. 34. С. 92-103.Кваліметричний метод оцінки кількісних та якісних параметрів сонячного елемента DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-09

URL: https://periodicals.karazin.ua/engineering/article/view/25095

42. Cubas J., Pindado S., Manuel C. Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function // Energies. 2014. V 7. P. 4098-4115.

43. Demant, M., Oswald, M., Welschehold, T., Nold, S., Bartsch, S., Schoenfelder, S., & Rein, S. Micro-cracks in silicon wafers and solar cells: detection and rating of mechanical strength and electrical quality. In Proceedings of the 29th Solar Energy Conference and Exhibition 2014pp. 390-396).

44. Dhimish, M. Micro cracks distribution and power degradation of polycrystalline solar cells wafer: Observations constructed from the analysis of 4000 samples. Renewable Energy, 2020. 145, 466 -477.

45. Dhimish, M. et al. The impact of cracks on photovoltaic power performance. Journal of Science: Advanced Materials and Devices, 2017.2(2), 199-209.

46. Dhimish, M., & Alrashidi, A. Photovoltaic degradation rate affected by different weather conditions: A case study based on pv systems in the uk and australia. Electronics. Photovoltaic. 2020. 9(4). 650.

47. Dhimish, M., Holmes, V. Solar cells micro crack detection technique using state-of-the-art electroluminescence imaging. Journal of Science: Advanced Materials and Devices, 2019. 4(4), 499 -508.

48. Dhimish, M., Holmes, V., Dales, M., & Mehrdadi, B. Effect of micro cracks on photovoltaic output power: case study based on real time long term data measurements. Micro & Nano Letters, 2017. 12(10), 803-807.

49. Dhimish, M., Holmes, V., Mather, P., Aissa, C., & Sibley, M. Development of 3D graph-based model to examine photovoltaic micro cracks. Journal of Science: Advanced Materials and Devices, 2018. 3(3), 380-388.

50. Dhimish, M., Holmes, V., Mehrdadi, B., & Dales, M. The impact of cracks on photovoltaic power performance. Journal of Science: Advanced Materials and Devices, 2017. 2(2), 199-209.

51. Dichev D., Diakov D., Zhelezarov I., Valkov S., Ormanova M., Dicheva R., Kupriyanov O. A method for correction of dynamic errors when measuring flat surfaces. Sensors, 2024. 24 (16):5154. P. 1-20. DOI: https://doi.org/10.3390/s24165154 URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/24/16/5154

52. Dolara, A. et al. Snail trails and cell microcrack impact on PV module maximum power and energy production. IEEE Journal of Photovoltaics, 2016. 6(5), 1269-1277.

53. Dongue S. B., Njomo D., Tamba J. G., Ebengai L. Modeling of Electrical Response of Illuminated Crystalline Photovoltaic Modules Using Four- and Five-Parameter Models // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2012. V 2. P. 612-619.

54. Eder Gabriele C, Voronko Yuliya, Dimitriadis Simon, Knöbl Karl, Újvári Gusztáv, Berger Karl A, et al. Climate specific accelerated ageing tests and evaluation of ageing induced electrical, physical, and chemical changes. Prog Photovolt, Res Appl 2019. 27(11):934–49. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.3090.

55. Eder, G. C., Voronko, Y., Hirschl, C., Ebner, R., Újvári, G., & Mühleisen, W. Non-destructive failure detection and visualization of artificially and naturally aged

PV modules. Energies, 2018. 11(5), 1053. https://doi.org/10.3390/en11051053

56. Gagliardi, M., & Paggi, M. (). Long-term EVA degradation simulation: Climatic zones comparison and possible revision of accelerated tests. Solar Energy, 2018. 159, 882-897.

57. Geoffrey K. Ontiri, Lilian L. Amuhaya. (). A Review of Emerging Photovoltaic Construction Technologies to Increase Efficiencies in Solar as a Renewable Energy Source. American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences. 2022. Vol. 85, No.1, P 348–369.

58. Gou, X., Li, X., Wang, S., Zhuang, H., Huang, X., & Jiang, L. The effect of microcrack length in silicon cells on the potential induced degradation behavior. International Journal of Photoenergy, 2018 (1), 4381579.

59. Goudelis, G., Lazaridis, P. I., Dhimish, M. A review of models for photovoltaic crack and hotspot prediction. Energies, 2022. 15(12), 4303.

*60.* Grunow, P., Clemens, P., Hoffmann, V., Litzenburger, B., & Podlowski, L. Influence of micro cracks in multi-crystalline silicon solar cells on the reliability of PV modules. Proceedings of the 20th EUPVSEC, 2005.2042-2047.

*61*. Grunow, P., Clemens, P., Hoffmann, V., Litzenburger, B., & Podlowski, L. Influence of micro cracks in multi-crystalline silicon solar cells on the reliability of PV modules. Proceedings of the 20th EUPVSEC, 2005. 2042-2047.

62. Hallam, B., Herguth, A., Hamer, P., Nampalli, N., Wilking, S., Abbott, M., ... & Hahn, G. Eliminating light-induced degradation in commercial p-type Czochralski silicon solar cells. Applied Sciences, 2017. 8(1), 10.

63. Ibrahim A. Effect of Shadow and Dust on the Performance of Silicon Solar Cell // Journal of Basic and Applied Sciences Research. 2011. V 1, № 3. P. 222-230.

*64*. Israil, M., Kerm, A. G. Non-destructive microcracks detection techniques in silicon solar cell. Physical Science International Journal, 2014. 4(8), 1073-1087.

65. Käsewieter, J., Haase, F., Larrodé, M. H., Köntges, M. Cracks in solar cell metallization leading to module power loss under mechanical loads. Energy Procedia, 2014. 55, 469-477.

66. Koester, L., Lindig, S., Louwen, A., Astigarraga, A., Manzolini, G., Moser,

D. Review of photovoltaic module degradation, field inspection techniques and techno-economic assessment. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022.165, 112616. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112616.

67. Köntges, M., Kajari-Schröder, S., Kunze, I., & Jahn, U. Crack statistic of crystalline silicon photovoltaic modules. In 26th European photovoltaic solar energy conference and exhibition 2011. Vol. 26, pp. 3290-3294.

68. Köntges, M., Kunze, I., Kajari-Schröder, S., Breitenmoser, X., Bjørneklett,
B. Quantifying the risk of power loss in PV modules due to micro cracks. In 25th
European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain 2010. pp. 3745-3752).

69. Kupriyanov O., Trishch R., Dichev D., Kupriianova K. A General Approach for Tolerance Control in Quality Assessment for Technology Quality Analysis. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2023. P. 330–339. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8\_31 URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-16651-8\_31

70. Kupriyanov O., Trishch R., Dichev D., Bondarenko T. Mathematic Model of the General Approach to Tolerance Control in Quality Assessment. Advanced Manufacturing Processes III. InterPartner 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2022. P. 415–423. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4\_41 URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-91327-4\_41

71. Lindig, S., Kaaya, I., Weiß, K. A., Moser, D., & Topic, M. (2018). Review of statistical and analytical degradation models for photovoltaic modules and systems as well as related improvements. IEEE Journal of Photovoltaics, 8(6), 1773-1786.

72. Martin, M., Chong, A., Biljecki, F., & Miller, C. Infrared thermography in the built environment: A multi-scale review. Renewable and sustainable energy reviews, 2022. 165, 112540.

73. Mathias, N., Shaikh, F., Thakur, C., Shetty, S., Dumane, P., & Chavan, D. S. Detection of micro-cracks in electroluminescence images of photovoltaic modules. In Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Science & Technology (ICAST). 2020

74. Meena, R., Pareek, A., & Gupta, R. A comprehensive Review on interfacial delamination in photovoltaic modules. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2024. 189, 113944.

75. Nguyen X. H., Nguyen M. P. Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in MATLAB/Simulink // Environmental Systems Research. 2015. V 4 (24). P. 7-22.

76. Omazic, A., Oreski, G., Halwachs, M., Eder, G. C., Hirschl, C., Neumaier, L., Erceg, M. Relation between degradation of polymeric components in crystalline silicon PV module and climatic conditions: A literature review. Solar energy materials and solar cells, 2019. 192, 123-133.

77. Panda A., Anisimov V., Anisimov V., Dyadyura K., Pandova I. The usage of material quality indicators to assess the properties of linear block-copolyurethanes based on oligoeters. MM Science Journal. 2022. P. 5979–5983. DOI: 10.17973/MMSJ.2022 11 2022020

78. Rahman, T., Mansur, A. A., Hossain Lipu, M. S., Rahman, M. S., Ashique,
R. H., Houran, M. A., ... & Hossain, E. Investigation of degradation of solar photovoltaics: A review of aging factors, impacts, and future directions toward sustainable energy management. Energies, 2023. 16(9), 3706. https://doi.org/10.3390/en16093706

79. Rudyk Y., Mykyichuk M., Menshykova O. Criteria for the use of information technology in assessing the quality of critical infrastructure by safety indexes. Information Technology for Education, Science, and Technics. 2024. P. 166– 179 DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4\_13 URL:https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-71801-4\_13

80. Said S., Massoud A., Benammar M., Ahmed S. A matlab/simulink based photovoltaic array model employing simpowersystems toolbox // Journal of Energy and Power Engineering. 2012. V 6. P. 1965-1975.

81. Salmi T., Bouzguenda M., Gastli A., Masmoundi A. MATLAB/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell // International Journal of Renewable energy researcg. 2012. №2. P. 213-218.

82. Seifi M., Che Soh A. Bt., Izzrib N., Wahab Abd., Khair M., Hassan B. Comparative Study of PV Models in Matlab/Simulink // International Scholarly and Scientific Research & Innovation. 2013. №7(2). P. 97-102.

83. Surya Kumari J., Sai Babu Ch. Mathematical Modelling and Simulation of Photovoltaic Cell Using MATLAB/Simulink Environment and PLECS Blockset // International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2012. V 2, № 1. P. 26-34.

*84*. Tao, W., Bao, G., Liu, J., Zhang, M., Wang, L., Dai, J., Jin, H. Modeling and Experimental Investigations of Thermo-Mechanical Stress Induced Micro-Cracks in Different Crystalline Silicon Photovoltaic Modules. Available at SSRN 4046698.

85. Teo, T. W., Mahdavipour, Z., & Abdullah, M. Z. (). Recent advancements in micro-crack inspection of crystalline silicon wafers and solar cells. Measurement Science and Technology, 2020. 31(8), 081001.

86. Trishch R., Nechuiviter O., Dyadyura K., Vasilevskyi O., Tsykhanovska I., Vakovlev M. Qualimetric method of assessing risks of low quality products. MM Science Journal. 2021. P. 4769–4774. DOI:10.17973/mmsj.2021\_10\_2021030 https://www.mmscience.eu/journal/issues/october-2021/articles/qualimetric-methodof-assessing-risks-of-low-quality-products

87. Trishch R., Nechuiviter O., Hrinchenko H., Bubela T., Riabchykov M., Pandova I. Assessment of safety risks using qualimetric methods. MM Science Journal. 2023. P. 6668-6674. DOI: 10.17973/MMSJ.2023\_10\_2023021 URL:https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A13%3A22598333/detailv2?sid=e bsco%3Aplink%3Ascholar&id=ebsco%3Agcd%3A172769550&crl=c&link\_origin=s cholar.google.com.ua

88. Van Mölken, J. I., Yusufoğlu, U. A., Safiei, A., Windgassen, H., Khandelwal, R., Pletzer, T. M., & Kurz, H. Impact of micro-cracks on the degradation of solar cell performance based on two-diode model parameters. Energy Procedia, 2012. 27, 167-172.

додатки
#### ДОДАТОК А

#### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз

1. Budanov P., Kyrysov I., Brovko K., Rudenko D., Vasiuchenko, P., Nosyk, A. Development of a Solar Element Model Using the Method of Fractal Geometry Theory. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021 Vol. 3, no. 8(111). P. 75–89.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.235882 (Scopus).

URL: https://journals.uran.ua/eejet/issue/view/14245

2. Budanov P., Khomiak E., Kyrysov I., Brovko K., Kalnoy S., Karpenko O. Building a model of damage to the fractal structure of the shell of the fuel element of a nuclear reactor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 4, № 8(118).P. 60–70.

DOI: 10.15587/1729-4061.2022.263374 (Scopus).

URL: https://journals.uran.ua/eejet/article/view/263374

### Статті у наукових фахових виданнях України

4. Кирисов I. Г., Буданов П. Ф., Хом'як Е. А., Бровко К. Ю. Підходи та вимоги до моделювання структури напівпровідникового шару сонячного елемента. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2022. № 1. С. 35–38.

DOI: 10.31649/1997-9266-2022-160-1-35-38

URL: https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/2730

(Особистий внесок здобувача: запропоновано для розрахунку величини реальної площі сприймаючої поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача, використати зміни властивостей внутрішньої структури напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача Проведено дослідження моделі сонячного фотоелектричного перетворювача з урахуванням загальної геометричної площі поверхневого напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача. Побудовані вольт-амперні характеристики фотоелектричного перетворювача з геометричною площею та з реальними площами поверхні.

Особистий внесок Буданов П. Ф.: перевірка наукової достовірності отримуваних результатів, редагування. Відповідні результати є матеріалами публікації.

Особистий внесок Хом'як Е. А.: попередня обробка та аналіз даних з їх візуалізацією, результати наведені у відповідній частині роботи.

Особистий внесок Бровко К. Ю.: аналіз моделей сонячних елементів. Відповідні результати є матеріалами публікації.).

5. Кирисов І. Г., Буданов П. Ф. Методи досліджень поглинаючої поверхні сонячних елементів. Машинобудування». 2022. № 29. С. 104–117.

DOI: 10.32820/2079-1747-2022-29-104-117

URL: https://jmash.uipa.edu.ua/index.php/jMASH/article/view/291/215

(Особистий внесок здобувача: розглянуті та проаналізовані основні вимоги до тонкоплівкових сонячних елементів проведено аналіз методів дослідження фізичних процесів у структурі напівпровідникового шару сонячного елемента. Запропоновано, розглянути дослідження фізичних процесів у структурі напівпровідникового шару сонячного елемента, а також вивчення фізичних властивостей тонких плівок для сонячного елемента, на основі наступних основних методів дослідження: сканувальна зондова (ємнісна) і тунельна мікроскопія (спектроскопія); атомна силова мікроскопія; рентгеноскопія; електронний мікроаналіз; сканувальна електронна мікроскопія; еліпсометрія; спектроскопічна еліпсометрія; електронна оже-спектроскопія; масспектрометрія вторинних іонів; фотолюмінісценція ; сканувальна лазерна мікроскопія.

Особистий внесок Буданов П. Ф.: перевірка наукової достовірності отримуваних результатів, редагування. Відповідні результати є матеріалами публікації.)

6. Budanov P., Kyrysov I. Qualimetric method of quality assessmentof solar battery parameters. Машинобудування. 2024. № 33. С. 64–77.

DOI: 10.32820/2079-1747-2024-33-64-77

URL: http://repo.uipa.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/8399/1/64-77.pdf

(Особистий внесок здобувача: розроблений кваліметричний метод оцінки параметрів фотоелектричного перетворювача сонячної батареї, який дозволяє підвищувати точність, стабільність вольт-амперної та вольт-ватної характеристик і визначити реальне значення величини вихідної потужності та ККД фотоелектричного перетворювача. Отримані аналітичні вирази, для обчислення вихідних параметрів, з врахуванням реальних геометричних структурних змін поверхневого шару фотоелектричного перетворювача, при наявності ушкоджуючих дефектів в вигляді макро- та мікротріщин и локальних неоднорідностей. Проведення експериментальних досліджень. Розробка алгоритму побудови математичної моделі фотоелектричного перетворювача сонячної батареї у системах схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink с активної сприймаючої Проведення врахуванням площі поверхні. обчислювального експерименту у системах схемотехнічного моделювання MATLAB/Simulink, який підтвердив вплив геометричних характеристик поверхневого шару фотоелектричного перетворювача на його вихідні параметри.

Особистий внесок Буданов П. Ф.: попередня обробка та аналіз даних з їх візуалізацією, перевірка наукової достовірності отримуваних результатів, редагування. Відповідні результати є матеріалами публікації.)

### Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Кирисов І. Г. Аналіз факторів, які впливають на структуру напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача в процесі експлуатації. Актуальні проблеми сучасної науки, суспільства та освіти: збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції. Харків, 2021 С. 394–397.

8. Кирисов І. Г. Чернюк А. М., Качанов Є. І. Засоби забезпечення процесу генерації та споживання електричної енергії в електроенергетичних системах з розподіленою генерацією з урахуванням фактору невизначеності погодних та кліматичних умов. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2020. № 1. С. 95–99.

9. Кирисов І. Г. Буданов П. Ф., Дослідження причин поверхневих дефектів напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача. V Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність та енергетична безпека електро енергетичних систем. Тези доповідей. 2021. С. 41.

10. Кирисов І. Г. Дослідження якості напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача процесі експлуатації. Міжнародна науковопрактична конференція «Якість, стандартизація та метрологічне забезпечення». Збірник матеріалів конференції. Харків: 2022. С. 47.

11. Кирисов І. Г. Буданов П. Ф. Хом'як Е. А.Бровко К. Ю. Підходи та вимоги для моделювання структури рельєфу напівпровідникового шару сонячного елементу. V Міжнародна науково-технічна конференція "Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2021)". Збірник наукових праць. Вінниця: "ВНТУ", 2021. С. 112–113.

12. Кирисов І. Г. Аналіз факторів, які впливають на структуру напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача в процесі експлуатації. VI Міжнародна науково- практична конференція «Проблеми сучасної науки та освіти». Матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції. Харків, 2021.– С. 394.

13. Кирисов І. Г. Аналіз факторів, які впливають на структуру напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача в процесі експлуатації сонячних електростанцій. Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні дослідження у світовій науці». Тези доповідей. Львів, 2022. С. 305–309.

14. Кирисов І. Г. Аналіз пошкоджень поверхні сонячних панелей, що виникають в процесі експлуатації сонячних електростанцій. ІХ Міжнародна

науково-практична конференція «Сучасні дослідження у світовій науці». Тези доповідей. Львів 2022., Р. 487-491.

15. Кирисов І. Г. Вплив пошкоджень поверхні сонячних панелей на їх параметри. Х Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні дослідження у світовій науці». Доповіді Х Міжнародної науково-практичної конференції. Львів, 2022. С. 407–411.

16. Кирисов І. Г. Аналіз пошкоджень фотоелектричних модулів в процесі експлуатації сонячних електростанцій. Національний науково-практичний форум «Наука. Інновації. Якість». Матеріали національного науково-практичного форуму. Харків, 2022. С. 52–54.

17. Кирисов І. Г. Моделювання фотоелектричних перетворювачів сонячних модулів з метою визначення їх параметрів і характеристик. Міжнародна науковопрактична інтернет-конференція «Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації». Збірник наукових праць. Переяслав, 2024. С. 216-219.

18. Кирисов І. Г., Гонтар І. В., Федченко-Галаган Є. С. Аналіз методів дослідження структури поверхні сонячних елементів. VII Міжнародна науковопрактична конференція «Перспективи сучасної науки: теорія і практика» (19-21 серпня 2024 р.). Матеріали 7 міжнародної науково-практичної конференції. Львів, 2024. С. 201-204.

19. Кирисов І. Г. Левченко М. І., Сук І. В., Хватова С. В. Вплив мікротріщин на поверхні сонячних батарей на їх параметри. VII Міжнародна науковопрактична конференція «Перспективи сучасної науки: теорія і практика» (19-21 серпня 2024 р.). Матеріали 7 міжнародної науково-практичної конференції. Львів. 2024. С. 205-208.

20. Кирисов І. Г., Чернюк А.М., Черевик Ю.О. Особливості технологічних схем генерації електроенергії альтернативними джерелами енергії. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». Харків: ХНТУСГ. 2019. № 204. С. 66–68. 21. Кирисов І. Г. Чернюк А.М., Сук І.В. Карлова О.М. Білоус І.О. Аналіз технологічних схем генерації електроенергії альтернативними джерелами енергії Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2019. Том 30(69). № 4. С. 33–41.

22. Кирисов І. Г., Чернюк А.М., Черевик Ю.О. Аналіз перспектив розвитку систем розподіленої генерації електроенергії в Україні. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2021. Том 32 (71). № 3. С. 239–246.

Монографії:

3. Кирисов І. Г., Буданов П. Ф., Хом'як Е. А. Фрактально-кластерний метод контролю оболонки тепловиділяючого елемента ядерного реактора. Achievements of Ukraine and EU countries in technological innovations and invention: Scientific monograph. Riga, Latvia: «Baltija Publishing», 2022. Р. 136–150.

DOI: 10.30525/978-9934-26-254-8-4

http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/book/268

### додаток б

151

# ДАНІ ПРО СЕРЕДНЬОДОБОВОЇ ІНСОЛЯЦІЇ ЗА КОЖЕН ДЕНЬ В РОЦІ

### Таблиця Б.1

Номер дня в році	Дата	Інсоляція, Вт-г
1	1 січня	867,81
2	2 січня	862,5
3	3 січня	866,56
4	4 січня	1034,06
5	5 січня	864,69
6	6 січня	990,31
7	7 січня	977,5
8	8 січня	883,13
9	9 січня	953,13
10	10 січня	924,69
11	11 січня	1021,56
12	12 січня	986,56
13	13 січня	1096,56
14	14 січня	1090,94
15	15 січня	1094,38
16	16 січня	999,06
17	17 січня	1177,81
18	18 січня	1153,75
19	19 січня	1118,13
20	20 січня	1198,44
21	21 січня	1040,31
22	22 січня	1240
23	23 січня	1176,88
24	24 січня	1249,69
25	25 січня	1345
26	26 січня	1237,19
27	27 січня	1320
28	28 січня	1382,19
29	29 січня	1213,13
30	30 січня	1502,5

Фрагмент бази даних середньодобової інсоляції за кожен день в році

### Фрагмент таблиці з результатами розрахунку сонячної енергії, що

Номер дня в році	Дата	Інсоляція, Вт-г
1	1 січня	2150,5
2	2 січня	2117,76
3	3 січня	2108,48
4	4 січня	2493,55
5	5 січня	2066.7
6	6 січня	2346,3
7	7 січня	2295,96
8	8 січня	2056,6
9	9 січня	2200,89
10	10 січня	2066,7
11	11 січня	2346,3
12	12 січня	2295,96
13	13 січня	2056,6
14	14 січня	2200,89
15	15 січня	2117,42
16	16 січня	2319,96
17	17 січня	2222,2
18	18 січня	2450,04
19	19 січня	2418,01
20	20 січня	2406,46
21	21 січня	2179,7
22	22 січня	2549,8
23	23 січня	2478,58
24	24 січня	2383,83
25	25 січня	2535,87
26	26 січня	2184,91
27	27 січня	2585,13
28	28 січня	2435,63
29	29 січня	2567,64
30	30 січня	2743,69
31	31 січня	2622,33

## попадає на 1м<sup>2</sup> похилої поверхні

### Таблиця Б.3

Номер дня у році	Дата	Електроенергія, Вт-г
1	1 січня	484,7
2	2 січня	477,34
3	3 січня	475,25
4	4 січня	562,05
5	5 січня	465,83
6	6 січня	528,86
7	7 січня	517,51
8	8 січня	463,56
9	9 січня	496,08
10	10 січня	465,83
11	11 січня	528,86
12	12 січня	517,51
13	13 січня	463,56
14	14 січня	496,08
15	15 січня	477,27
16	16 січня	522,92
17	17 січня	500,88
18	18 січня	552,24
19	19 січня	545,02
20	20 січня	542,42
21	21 січня	491,30
22	22 січня	574,72
23	23 січня	558,67
24	24 січня	537,32
25	25 січня	571,59
26	26 січня	492,48
27	27 січня	582,69
28	28 січня	548,99
29	29 січня	578,75
30	30 січня	618,43
31	31 січня	591,07

### Фрагмент даних про щоденне вироблення електроенергії з 1м<sup>2</sup> похилої поверхні

**ДОДАТОК В** 

154

### ДОКУМЕНТИ, ЯКІ ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ ОСНОВНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

#### ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор з науково-педагогічної реботи Української інженерно-педагогічної



про впровадження результатів дисертаційної роботи Кирисова Ігоря Геннадійовича на тему: «Метод кількісного оцінювання якості параметрів елементів сонячної батареї», що подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 175 – інформаційно-вимірювальні технології

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи Кирисова Ігоря Геннадійовича впроваджені у навчальний процес кафедри електротехніки та електроенергетики при проведенні занять з дисциплін: «Фотоелектричні станції та засоби накопичення електричної енергії»; «Концепції сталого розвитку та енергетичної безпеки»; «Аналіз і моделювання процесів в електричних системах та об'єктах»; «Системи розподіленої генерації».

Практичні результати використовуються при викладанні вищезгаданих дисциплін, а також під час виконання курсових та дипломних робіт студентами електроенергетичних спеціальностей.

Завідувач кафедри електротехніки і електроенергетики

Артем ЧЕРНЮК

# МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКА ІНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГІЧНА АКАДЕМІЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ Проректор з наукової роботи Олександр КУПРІЯНОВ MAR 2024року

N107-04-130

#### AKT

про впровадження результатів дисертаційної роботи Кирисова Ігоря Геннадійовича на тему: «Метод кількісного оцінювання якості параметрів елементів сонячної батареї», що подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 175 - інформаційно-вимірювальні технології

Запропонований метод кількісного оцінювання якості параметрів елементів сонячної батареї, який викладено у дисертації Кирисова І.Г., використано в Українській інженерно-педагогічній академії при виконанні науково-дослідної роботи «Розроблення проєкту сонячної панелі на основі моделювання поверхні сонячного елемента із застосуванням фрактальної геометрії» (державний реєстраційний номер: 0122U200539), в якій здобувач Кирисов Ігор Геннадійович, був виконавцем.

Доцент кафедри

фізики, електротехніки і електроенергетики керівник НДР № 0122U200539

Joy,

Павло БУДАНОВ

Завідувач кафедри електротехніки і електроенергетики

Артем ЧЕРНЮК

ЗАТВЕРДЖУЮ Директор ТОВ «Екватор Сан Енерджі» Олександр РОМАНЮК 2029 року mal AKT

про впровадження результатів дисертаційної роботи Кирисова Ігоря Геннадійовича на тему: «Метод кількісного оцінювання якості параметрів сонячної батареї», що подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 175 – інформаційно-вимірювальні технології

Ми що підписалися нижче, директор ТОВ «Екватор Сан Енерджі» Олександр РОМАНЮК, інженер-енергетик В'ячеслав МЕЛЬНИКОВ від УІПА завідувач кафедри електротехніки і електроенергетики к.т.н., доц. Артем ЧЕРНЮК, науковий керівник к.т.н., доц. Павло БУДАНОВ, здобувач Ігор КИРИСОВ склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Ігора Кирисова впроваджені на підприємстві.

У подальшому результати досліджень будуть використані при експлуатації сонячних модулів на підприємстві.

Цей акт не є підставою для фінансових розрахунків.

Від ТОВ «Екватор Сан Енерджі» Від УІПА Завідувач кафедри ЕтаЕЕ, Директор к.т.н., доцент Олександр РОМАНЮК Артем ЧЕРНЮК Науковий керівник к.т.н., доцент Інженер-енергетик Павло БУДАНОВ В'ячеслав МЕЛЬНИКОВ Здобувач Ігор КИРИСОВ

УДК 621.311.2 № держреєстрації <u>0122 U 200539</u>

### МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

### УКРАЇНСЬКА ІНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГІЧНА АКАДЕМІЯ

«ЗАТВЕРДЖУЮ» Проректор з наукової роботи Купріянов О.В. 07 2021 року

**3BIT** 

#### ПРО НАУКОВО – ТЕХНІЧНУ РОБОТУ

### «РОЗРОБЛЕННЯ ПРОЕКТУ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ НА ОСНОВІ МОДЕ-ЛЮВАННЯ ПОВЕРХНІ СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА ІЗ ЗАСТОСУВАН-НЯМ ФРАКТАЛЬНОЇ ГЕОМЕТРІЇ »

(заключний 2021 р.)

1

Декан факультету енергетики, і автоматизації, к. т. н., доц.

Керівник НДР, к. т. н., доц.

Керівник групи з наукової діяльності, к. т. н., доц.

Г.С. Грінченко

Н.С. Антоненко

А.М. Чернюк

Рукопие јакличено 1.06.2021 р. Репунотани робони розненуто науково – технично радого УПА Протокан в1 в 29.06.2021 р. NB Харків 2021

157

#### ПЕРЕЛІК ВИКОНАВЦІВ

Керівник теми, доцент, канд. техн. наук

Доцент, канд. техн. наук

Доцент, канд. техн. наук

Аспірант

Аспірант

Аспірант

Здобувач вищої освіти

ANA MAR refut refut refut Mana

2

А.М. Чернюк (загальне та наукове керівництво,)

П.Ф Буданов (розділ 1) К.Ю.Бровко (розділ 2) І. Г. Кирисов (розділ 1-2) Ю.О.Черевик (розділ 1) Є.І. Качанов (розділ 2) І.А. Кучеренко (розділ 1) Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

### протокол

створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 07:11:38 03.07.2025

Назва файлу з підписом: Дисертація Кирисов I.Г..pdf.asice Розмір файлу з підписом: 4.8 МБ

Перевірені файли: Назва файлу без підпису: Дисертація Кирисов І.Г..pdf Розмір файлу без підпису: 5.3 МБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: КИРИСОВ ІГОР ГЕННАДІЙОВИЧ П.І.Б.: КИРИСОВ ІГОР ГЕННАДІЙОВИЧ Країна: Україна РНОКПП: 2942210793 Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 07:11:35 03.07.2025 Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК" Серійний номер: 5E984D526F82F38F04000000F039E01BD59F705 Алгоритм підпису: ДСТУ 4145 Тип підпису: Удосконалений Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E) Формат підпису: 3 повними даними для перевірки (XAdES-B-LT) Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2025.02.05 13:00