

**НАКАШИДЗЕ ЛІЛІЯ**

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

<https://orcid.org/0000-0003-3990-6718>e-mail: [foton\\_dnu@ukr.net](mailto:foton_dnu@ukr.net)**МАЗУРИК СТАНІСЛАВ**

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

<https://orcid.org/0000-0001-5532-6372>e-mail: [stas\\_mazurik@ukr.net](mailto:stas_mazurik@ukr.net)**КОРСУНСЬКИЙ РОДІОН**

The Stony Brook School (NY, США)

<https://orcid.org/0009-0001-5361-0641>e-mail: [rodion.korsunskyi@sbs.org](mailto:rodion.korsunskyi@sbs.org)

## **ЧИННИКИ ПОЛІПШЕННЯ ЗАХИСТУ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ - СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ.**

*У роботі представлено дослідження фізико технологічного підходу до захисту сонячних батарей задля запобігання локальних перегрівів електричного походження, які виникають внаслідок невідповідності фотострумів в послідовних з'єднаннях сонячних елементів. Було встановлено, що запобіжники на основі полімерних композитів здатні функціонувати як багаторазові запобіжники, які не впливають на роботу сонячної батареї і здатні ефективно ізолювати сонячні елементи шляхом виконання функції переходу в малопровідний стан в екстрених ситуаціях, пов'язаних з нагріванням р-п структури фотоелемента.*

*Ключові слова: Сонячні батареї, полімерні композити, запобіжники, фотострум*

LILYA NAKASHYDZE, STANISLAV MAZURYK

Oles Honchar Dniprovsky National University

RODION KORSUNSKYI

The Stony Brook School (NY, США)

## **FACTORS FOR IMPROVING PROTECTION OPTOELECTRONIC DEVICES - SOLAR PANELS**

*The work presents a study of the physical and technological approach to the solar panels protection to prevent local overheating of electrical origin, which occur because of mismatch of photocurrents in serial connections of solar elements. It is determined that the currently used widely known methods lead to a significant increase in the massive parameters of photoelectric installations. Modern methods of protecting solar installations, such as the use of diodes or active protection systems, are not universal approaches to solving the problem. Therefore, the approach is relevant to the authors on the development and research of solar protection methods. Thus, it is advisable to use polymer-composing devices, which similarly to traditional fuses, limit the flow of dangerously high reverse current during the inconsistency of electrical indicators in the solar panel. The work conducted the study that determines the effect of self-renovation polymer-composing fuses on photoelectric characteristics of the solar battery. In addition, there was done analysis to determine the prospect of using PPTC-cards as elements of thermal protection of solar panels. It has been found that polymer composites are capable of functioning as multiple fuses that do not affect the solar battery and are able to effectively isolate solar elements by performing the function of transition into an inferior state in emergencies associated with the heating of the P-N structure of the photoelement. It is experimentally established that polymer-composing fuses are able to effectively isolate the solar elements, turning to a low-conduct in emergencies associated with the heating of the solar element. The prospects of the solar panel with a two-layer structure of the polymer composite and the solar element in commercial installations are analyzed. In particular, the long-term return of fuses to a high-conducting state and a high temperature of the beginning of the phase transition of the material, which limits the use of polymer-composing fuses for electric heat protection of solar cells, especially in regions with temperate climates.*

*Keywords: Solar batteries, polymer composites, fuses, photocurrent*

### **Постановка проблеми у загальному вигляді**

#### **та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями**

Відновлювальні джерела енергії набувають зростаючого зацікавлення та широкого визнання у світі. На даний час вітрова та сонячна енергетики досягли рекордних 12% світового виробництва електроенергії, згідно з останнім глобальним оглядом електроенергетики аналітичного центру Ember [1]. З огляду на зростаючі масштаби впровадження сонячних батарей, ще більш важливим стає розуміння продуктивності та надійності сонячних батарей. Вирішення технічних аспектів для підвищення цих показників розроблено на даний час доволі детально. Але методи що використовуються призводять до суттєвого підвищення масогабаритних параметрів фотоелектричних установок [2]. Сучасні методи захисту сонячних установок, такі як використання діодів або систем активного захисту, не є універсальними підходами до вирішення проблеми [3]. Тому необхідним є подальше удосконалення в розробках та дослідженнях методів захисту сонячних батарей.

### **Аналіз досліджень та публікацій**

В роботі [4] показано результати проведених досліджень методу захисту сонячних батарей, заснованого на використанні відносно недорогих електронних компонентів, зроблених із композитних матеріалів, таких як вуглецевий наповнювач у полімерній матриці з поліетилену, виготовлених за технологією запобіжника PolySwitch. PPTC-запобіжники типу PolySwitch активно використовуються для захисту електронних пристроїв від перенапруги і теплових перенавантажень [4]. Але, аналіз літературних джерел

показав недостатність досліджень та розробок, щодо використання даних електронних компонентів в технологічних рішеннях захисту сонячних батарей від термовпливу.

У роботах [3, 14-17] показано, що актуальним є використання полімерно-композитних пристроїв, які аналогічно традиційним запобіжникам, обмежують потік небезпечно високого зворотного струму під час невідповідності електричних показників в сонячній батареї. В роботах показано, що пристрій PolySwitch здатен самовідновлюватися після ліквідації несправностей, що може з економічної точки зору зменшити витрати на гарантійне обслуговування, ремонт сонячних батарей та заміну запобіжників.

#### Формулювання цілей статті

Мета роботи полягає у покращенні захисту батарей сонячних установок і підвищенні надійності та терміну їх функціонування.

Для цього потрібно вирішити наступні задачі:

- дослідити вплив самовідновлювальних полімерно-композитних запобіжників на фотоелектричні характеристики сонячної батареї;

- визначити перспективи використання РРТС-запобіжників як елементів теплового захисту сонячних батарей.

#### Виклад основного матеріалу

Методика експериментальних досліджень базується на тому принципі, що для підвищення надійності функціонування сонячних батарей у складних ситуаціях може бути доцільним тимчасове відключення (ізоляція) відповідних елементів. Шляхом ізоляції можна запобігти переходу сонячного елемента у стан, де він функціонує як електричне навантаження, а не генератор електричної енергії, шляхом використання контрольованого знеструмлення сонячних елементів. Вирішення цієї проблеми може бути реалізоване через використання додаткового пристрою, а саме використання самовідновлюваних запобіжників РРТС (polymeric positive temperature coefficient) типу PolySwitch.

PolySwitch запобіжники являють собою нанокompозити з непровідною полімерною матрицею та високопровідним наповнювачем. У робочому діапазоні температур (ділянка між точками 1 та 2 на рис. 1), провідні частинки наповнювача формують низько опірні з'єднання. Однак, якщо температура запобіжника підвищується вище температури перемикання пристрою (температура в точці 2 на рис. 1), або внаслідок від протікання високого струму через запобіжник, або через збільшення температури навколишнього середовища, то з'єднання із часток вуглецю розриваються за рахунок об'ємного розширення полімерної матриці і/або трансформації кристалічної структури матриці в аморфну і відповідно електричний опір розглянутої структури різко нелінійно зростає (ділянка між точками 2 та 3 на рис. 1). В точці 3 (рис. 1) структура провідних з'єднань повністю руйнується і РРТС-запобіжник досягає малопровідного стану електропровідності [3].

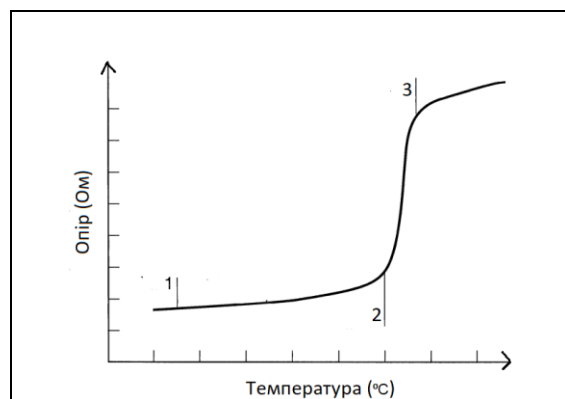


Рис.1 Схематичне зображення залежності опору РРТС-запобіжника від температури [14]

З точки зору впровадження системи захисту від перегріву окремих елементів сонячних батарей, використання РРТС-запобіжників із вираженою температурною залежністю опору видається функціонально обґрунтованим. Проведення аналізу впливу цього фактора на фотоелектричні характеристики сонячних батарей є важливим для оптимізації роботи сонячної батареї.

Для експериментального вивчення можливостей самовідновлювальних запобіжників розглянутого типу досліджувалася модельна структура, що являє собою послідовне з'єднання моделі сонячної батареї та РРТС-запобіжника. В якості навантаження такого джерела живлення використовувався прилад «магазин опорів вимірювальний». Вибір зазначеної модельної структури обґрунтовувався тим, що вона відповідає послідовному з'єднанню сонячних елементів у сонячних батареях.

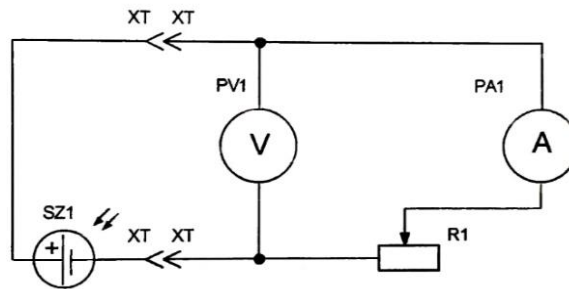
Під час експериментального дослідження використовувалася сонячна батарея на основі монокристалічного кремнію, зразки сонячних елементів на основі монокристалічного кремнію і РРТС-запобіжник. Вимірювання проводилися з використанням імітатора сонячного випромінювання, який створює потік випромінювання  $1000 \text{ Вт/м}^2$ .

Основними характеристиками, які вимірювалися:

- вольт-амперні залежності;

- залежності потужності експериментальної моделі сонячної батареї та температури PolySwitch запобіжника від часу.

Вимірювання ВАХ відбувалися за методикою, що базується на прямому вимірюванні енергетичних характеристик експериментальної модельної структури сонячної батареї. Схема вимірювальної установки наведено на рис 2.



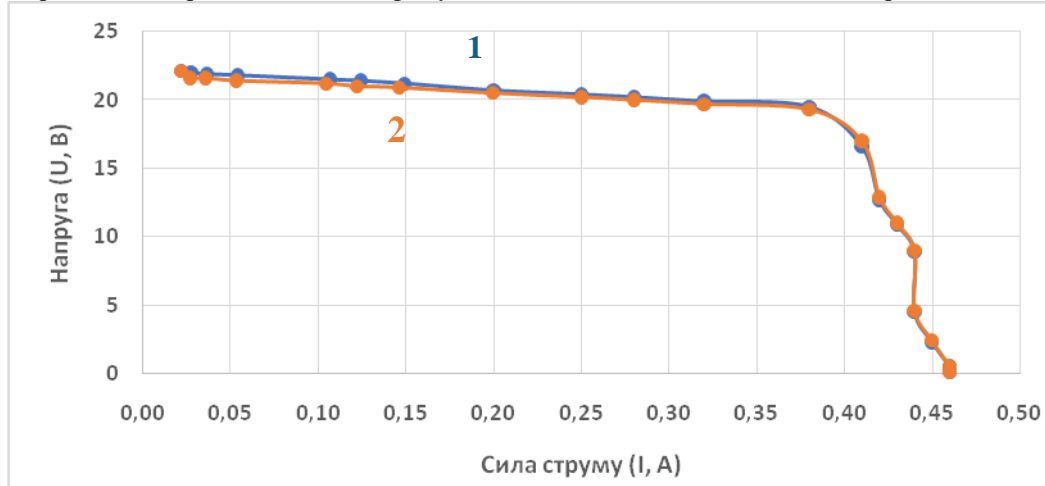
SZ1-сонячна батарея, PA1 і PV1- цифрові мультиметрів типу UNI-T, UT801, R1 - магазин опорів P33  
**Рис. 2.** Електрична схема для вимірювання вольт-амперних кривих фотоелектричних систем[17]

На рис. 3 наведені результати вимірювань вольт-амперних кривих сонячної батареї. Вимірювання проводились відповідно таких варіантів:

- сонячна батарея з наявністю самовідновлювальних запобіжників
- сонячна батарея без елементів захисту.

Безпосередньо вимірювалися значення сили струму (I, A) та напруги (U, V) за умови дискретної зміни зовнішнього навантаження.

Отримані експериментальні дані фіксувалися автоматично для подальшої обробки та аналізу.



**Рис. 3** Експериментально виміряні вольт-амперні характеристики сонячної батареї без (1) і з PolySwitch запобіжником (2) при температурі 18°C навколишнього середовища.

Згідно з результатами вимірювань, представлених на рис. 3, послідовне додавання самовідновлювального запобіжника до складу сонячної батареї не вплинуло на її функціональні фотоелектричні характеристики при температурі запобіжника (співпадає з температурою навколишнього середовища), яка нижча за температуру початку його фазового переходу.

Отриманий результат безпосередньо підтверджується теорією електричної провідності полімерних композитів та є критично важливим показником.

Вимірювання основних показників, представлених на рис. 4, відбувалися за допомогою автоматизованого технічного рішення, NTC датчик температури було закріплено термопастою до запобіжника PolySwitch для отримання якісного термічного контакту та збільшення точності вимірювань.

Навантаження магазину опорів становило 60 Ом та не змінювалось протягом усього процесу дослідження.

Для дослідження перехідного процесу ізоляції ланцюга сонячних елементів PolySwitch запобіжник поступово нагрівався до температури початку фазового переходу, після чого нагрівання припинялося. На 38-ій секунді PolySwitch досяг температури перемикачання. При цьому опір пристрою різко зріс. Важливим є значення температури запобіжника в момент його спрацювання, яке експериментальним чином було визначено та сягає близько 130°C.

Отже, експериментальний зразок сонячної батареї було ізольовано внаслідок спрацювання запобіжника при досягненні температури фазового переходу в процесі його нагрівання.

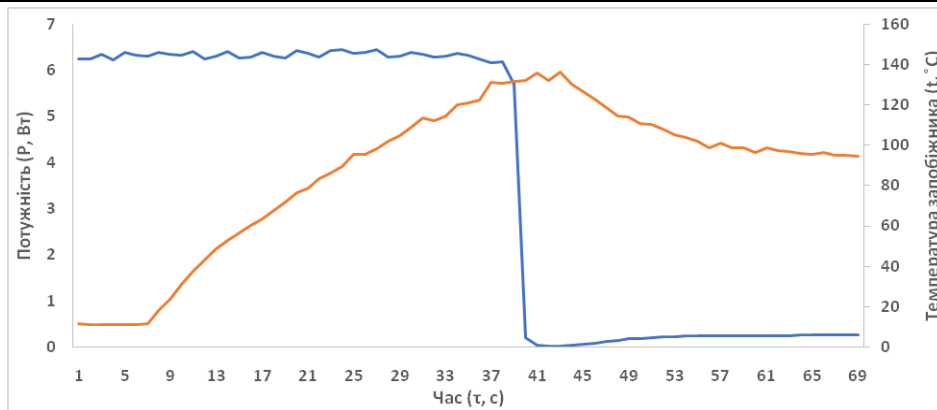


Рис. 4 Часові залежності потужності сонячної батареї (1) та температури PolySwitch запобіжника (2) під час дослідження перехідних процесів ізоляції від термовпливу в системі

Пропонується підключати запобіжники PolySwitch до кожного сонячного елемента послідовно у їх паралельному з'єднанні. Таке підключення є оптимальним для уникнення аномальних ситуацій, пов'язаних з повною втратою електричної енергії, які можуть виникнути під час короткого замикання одного з субмодулів.

Доволі високі температури початку фазового переходу запобіжників певною мірою обмежують їх широке використання як елементів захисту від перегріву, особливо якщо причина перегріву є тимчасова [3, 10, 14-16].

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Експериментально досліджено вплив позисторних полімерно-композитних запобіжників на фотоелектричні параметри моделі сонячної батареї. Виявлено, що наявність запобіжника не впливає на рівень ефективності фотоелектричної установки.

Експериментально встановлено, що полімерно-композитні запобіжники спроможні ефективно ізолювати сонячні елементи, переходячи в малопровідний стан у екстремних ситуаціях, пов'язаних з нагріванням сонячного елемента.

Проаналізовано перспективи моделі сонячної батареї з двошаровою структурою полімерного композита та сонячного елемента в комерційних установках. Зокрема, вказано на тривалий час повернення запобіжників в високопровідний стан та високу температуру початку фазового переходу матеріалу, що обмежує використання полімерно-композитних запобіжників для електротеплового захисту сонячних елементів, в особливості в регіонах з помірним кліматом.

Окреслено, що блокування деградованих окремих сонячних елементів у системі, дозволить створити стійку до різних негативних впливів сонячну енергогенерувальну систему, що сприятиме зниженню вартості генерованої енергії.

Отже, розвиток сучасної бази твердотільної електроніки дозволяє використовувати та досліджувати перспективний та дешевий засіб захисту пристроїв перетворення сонячної енергії в електричну від виникнення локальних перегрівів електричного походження.

#### Література

1. Енергетичний аналітичний центр Ember. URL: <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/>
2. Marc Köntges, Sarah Kurtz, Corinne Packard, Ulrike Jahn, Karl A. Berger, Kazuhiko Kato, Thomas Friesen, Haitao Liu, Mike Van Iseghem. Performance and Reliability of Photovoltaic Systems. International energy agency photovoltaic power systems programme. Subtask 3.2: Review of Failures of Photovoltaic Modules. 2014. P. 140.
3. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Nakashydz L. V., Lyashkov A. Yu., Gomilko I. V. Application of polymer posistor nanocomposites in systems for protecting photovoltaic components of solar arrays from electrical overloads. Monograph. – Primedia eLaunch, Boston, USA, 2021. – 172 p.
4. Fundamentals of PolySwitch Overcurrent and Overtemperature Devices. URL: <https://www.electrokit.com/uploads/productfile/41012/circuit-protection-psw-fundamentals.pdf>
5. NASA: Shadow effects on a series-parallel array of solar cells. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19650020213>
6. Кurysov I.G., Mykhailov B.K., Losenko Ye.V. Influence of shading and damage of solar batteries on their parameters. Серія: Технічні науки. 2023. 180-185 p.
7. Romênia G. Vieira, Fábio M. U. de Araújo, Mahmoud Dhimish, and Maria I. S. Guerra. A Comprehensive Review on Bypass Diode Application on Photovoltaic Modules
8. Ye Zhao. The Department of Electrical and Computer Engineering. Northeastern University Boston, Massachusetts December, 2010. 136 p.

9. Rúben Vicente Fonseca Batista. The impact of shadowing in photovoltaic systems and how to minimize it. An analysis with the PVsyst software. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1214973/FULLTEXT01.pdf>
10. Mismatch Effects in Arrays. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/mismatch-effects-in-arrays>
11. Citation for published version (Harvard): Guerriero, P, Tricoli, P & Daliento, S 2019, 'A bypass circuit for avoiding the hot spot in PV modules', *Solar Energy*, vol. 181, pp. 430-438.
12. Photovoltaic Hot Spot Detection for Solar Panel Substrings Using AC Parameter Characterization Katherine A. Kim, Member, IEEE, Gab-Su Seo, Student Member, IEEE, Bo-Hyung Cho, Fellow, IEEE, and Philip T. Krein, Fellow, IEEE.
13. d'Alessandro, V., Guerriero, P., & Daliento, S. (2013). A simple bipolar transistor-based bypass approach for photovoltaic modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(1), 405-413. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2282736>
14. PolySwitch Resettable Devices, Telecom Fuses, SiBar Thyristor Surge Protectors & ROV Metal Oxide Varistors. URL:[http://bitsavers.org/components/raychem/2004\\_Raychem\\_Circuit\\_Protection\\_Catalog.pdf](http://bitsavers.org/components/raychem/2004_Raychem_Circuit_Protection_Catalog.pdf)
15. Fundamentals of PolySwitch Overcurrent and Overtemperature Devices. Tyco Electronics. URL: <https://www.electrokit.com/uploads/productfile/41012/circuit-protection-psw-fundamentals.pdf>
16. A. S. Tonkoshkur, A. V. Ivanchenko, I. V. Nakashydzhe, S. V. Mazurik. Application of resettable elements for electrical protection of solar batteries. *Technology and design in electronic equipment*. 2018. 43-49 p.
17. Застосування фотоелектричних систем для отримання електричної енергії: Навчальний посібник / Л. В. Накашідзе, В. О. Габрінець, Ю. О. Мітіков. – Дніпропетровськ: ДНУ імені Олеся Гончара, ТОВ «Акцент ПП», 2016. – 146с.
18. Different methods to obtain the I–V curve of PV modules: Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference.

### References

1. Enerhetychnyi analitychnyi tsentr Ember [Ember energy analytical centre]. URL: <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/>
2. Marc Köntges, Sarah Kurtz, Corinne Packard, Ulrike Jahn, Karl A. Berger, Kazuhiko Kato, Thomas Friesen, Haitao Liu, Mike Van Iseghem. Performance and Reliability of Photovoltaic Systems. International energy agency photovoltaic power systems programme. Subtask 3.2: Review of Failures of Photovoltaic Modules. 2014. P. 140.
3. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Nakashydzhe L. V., Lyashkov A. Yu., Gomilko I. V. Application of polymer posistor nanocomposites in systems for protecting photovoltaic components of solar arrays from electrical overloads. Monograph. – Primedia eLaunch, Boston, USA, 2021. – 172 p.
4. Fundamentals of PolySwitch Overcurrent and Overtemperature Devices. URL: <https://www.electrokit.com/uploads/productfile/41012/circuit-protection-psw-fundamentals.pdf>
5. NASA: Shadow effects on a series-parallel array of solar cells. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19650020213>
6. Kyrysov I.G., Mykhailov B.K., Losenko Ye.V. Influence of shading and damage of solar batteries on their parameters. *Серія: Технічні науки*. 2023. 180-185 p.
7. Romênia G. Vieira, Fábio M. U. de Araújo, Mahmoud Dhimish, and Maria I. S. Guerra. A Comprehensive Review on Bypass Diode Application on Photovoltaic Modules
8. Ye Zhao. The Department of Electrical and Computer Engineering. Northeastern University Boston, Massachusetts December, 2010. 136 p.
9. Rúben Vicente Fonseca Batista. The impact of shadowing in photovoltaic systems and how to minimize it. An analysis with the PVsyst software. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1214973/FULLTEXT01.pdf>
10. Mismatch Effects in Arrays. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/mismatch-effects-in-arrays>
11. Citation for published version (Harvard): Guerriero, P, Tricoli, P & Daliento, S 2019, 'A bypass circuit for avoiding the hot spot in PV modules', *Solar Energy*, vol. 181, pp. 430-438.
12. Photovoltaic Hot Spot Detection for Solar Panel Substrings Using AC Parameter Characterization Katherine A. Kim, Member, IEEE, Gab-Su Seo, Student Member, IEEE, Bo-Hyung Cho, Fellow, IEEE, and Philip T. Krein, Fellow, IEEE.
13. d'Alessandro, V., Guerriero, P., & Daliento, S. (2013). A simple bipolar transistor-based bypass approach for photovoltaic modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(1), 405-413. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2282736>
14. PolySwitch Resettable Devices, Telecom Fuses, SiBar Thyristor Surge Protectors & ROV Metal Oxide Varistors. URL:[http://bitsavers.org/components/raychem/2004\\_Raychem\\_Circuit\\_Protection\\_Catalog.pdf](http://bitsavers.org/components/raychem/2004_Raychem_Circuit_Protection_Catalog.pdf)
15. Fundamentals of PolySwitch Overcurrent and Overtemperature Devices. Tyco Electronics. URL: <https://www.electrokit.com/uploads/productfile/41012/circuit-protection-psw-fundamentals.pdf>
16. A. S. Tonkoshkur, A. V. Ivanchenko, I. V. Nakashydzhe, S. V. Mazurik. Application of resettable elements for electrical protection of solar batteries. *Technology and design in electronic equipment*. 2018. 43-49 p.
17. Застосування фотоелектричних систем для отримання електричної енергії [The use of photovoltaic systems to generate electricity]: Навчальний посібник / Л. В. Накашідзе, В. О. Габрінець, Ю. О. Мітіков. – Дніпропетровськ: ДНУ імені Олеся Гончара, ТОВ «Акцент ПП», 2016. – 146с.
18. Different methods to obtain the I–V curve of PV modules: Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference.