

К. ф.-м. н. В. Р. КОЛБУНОВ, д. ф.-м. н. О. С. ТОНКОШКУР, С. В. МАЗУРИК,
к. ф.-м. н. О. Ю. ЛЯШКОВ, д. т. н. Л. В. НАКАШИДЗЕ

Україна, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

E-mail: kolbunov_vadim@i.ua

ЗАХИСТ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ ВІД ПЕРЕГРІВУ ЗА ДОПОМОГОЮ КРИТИЧНИХ ТЕРМОРЕЗИСТОРІВ НА ОСНОВІ ДІОКСИДУ ВАНАДІЮ

Досліджено можливості використання критичних терморезисторів на основі діоксиду ванадію для запобігання локальних перегрівів у фотоелектричних компонентах сонячних батарей. Терморезисторні елементи виробляли зі склокерамічних матеріалів на основі діоксиду ванадію та ванадій-фосфатного скла системи $V_2O_5 - P_2O_5$, в яких стрибкоподібно, на півтора-два порядки, змінюється величина електричного опору в області температури $70^\circ C$. Результати досліджень показали, що розглянуті елементи захисту можуть функціонувати як багаторазові (самовідновлювальні) запобіжники електротеплових перевантажень в сонячних батареях, які реагують безпосередньо на досягнення граничної для експлуатації фотоелектричних елементів температури.

Ключові слова: критичний терморезистор, діоксид ванадію, фотоелектричний елемент, локальний перегрів.

Одним із найбільш небажаних джерел суттєвого погіршення надійності фотоелектричних компонентів сонячних батарей є виникнення перегрівів, пов'язаних із електричним навантаженням. Фізичними причинами таких ситуацій можуть бути пошкодження корозією в процесі експлуатації складових елементів, приховані виробничі дефекти або деградація ізоляції під дією навколишнього середовища [1, 2].

На сьогодні існує низка методів і засобів запобігання появі електричних перевантажень: байпасні (обвідні) діоди, резисторні дільники, активні обвідні транзисторні перемикачі [3—8]. Найпоширенішим технічним рішенням цих проблем є використання додаткових елементів — байпасних діодів [3—5]. Однак практика встановлення таких діодів паралельно ланцюжку сонячних елементів показала, що “гарячі плями” все ж таки виникають, і це призводить до прискореного погіршення характеристик сонячних батарей. Обвідні діоди найбільш ефективні для запобігання виникненню “гарячих плям” у разі коротких послідовностей сонячних елементів, але такі конструкції не застосовуються в сучасних панелях з економічних міркувань. З іншого боку, вони, як і інші згадані схемотехнічні рішення, реагують в основному на електричні перевантаження (як правило, на перенапругу), а підвищення температури не є для них вхідним контрольованим параметром. Елементами захисту, які реагують безпосередньо на підвищення температури, можуть бути, наприклад, терморезистори на основі матеріалів з фазовим переходом «метал — напівпровідник» (ФПМН), розглянуті теоретично в [9]. Ці твердотільні елементи, так звані критичні терморезистори, мають температурну залежність електричної провідності, що стрибкоподібно зростає при досягненні температури

фазового переходу T_f . Конструктивно тепловий захист реалізується шляхом доповнення окремого фотоелектричного елемента терморезисторним елементом захисту, що знаходиться з ним у тепловому контакті. При їх паралельному підключенні та нагріванні фотоелектричного елемента останній може бути “закорочений” терморезистором внаслідок його переходу з низькопровідного у високопровідний стан.

Слід зазначити, що такі терморезистори мають широке застосування у реалізації пристроїв автоматичного контролю, перемикачів та обмежувачів потужності, термоелектричних перетворювачів електричних та оптичних сигналів тощо. Однак відомостей про їхнє використання у сонячних батареях у літературі нами не знайдено.

Нами проведено експериментальне обґрунтування можливостей та перспектив використання терморезисторів на основі діоксиду ванадію для запобігання перегріву у колах фотоелектричних систем сонячних батарей. У цій роботі наводяться результати досліджень впливу температури на електричні характеристики моделі фотоелектричного модуля, що являє собою систему послідовно з'єднаних фотоелектричних елементів з додатковим терморезисторним елементом на основі діоксиду ванадію, що знаходяться в тепловому контакті.

Електричні властивості терморезистора на основі діоксиду ванадію

Для виготовлення терморезисторного елемента використовувалися склокерамічні матеріали на основі діоксиду ванадію і ванадій-фосфатного скла системи $V_2O_5 - P_2O_5$, описані в [10]. Як і у монокристалічному діоксиді ванадію, в цих матеріалах відбувається ФПМН, ініційований

зміною температури, що супроводжується різкою зміною теплофізичних, електричних та магнітних властивостей (зміна електроопору досягає декількох порядків). Температура фазового переходу становить $T_t \approx 68^\circ\text{C}$. За температур, нижчих T_p , вказані склокерамічні матеріали мають напівпровідникові властивості, вищих T_t — металеві.

На рис. 1, а наведено температурну залежність опору зразка склокераміки на основі діоксиду ванадію, яка демонструє зазначений стрибок опору в області температури 70°C , пов'язаний з ФПМН. При отриманні цієї залежності швидкість зростання температури не перевищувала $1^\circ\text{C}/\text{хв}$, а похибка виміру температури була не більшою за $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Електронні пристрої на основі таких матеріалів можуть працювати при високих електричних струмах. Це дозволяє створювати елементи, відомі як порогові перемикачі та терморезистори. Критичні терморезистори, що поєднують властивості теплового реле і терморезистора з від'ємним температурним коефіцієнтом опору, можуть, зокрема, використовуватися для ефективного захисту від перегрівів пристроїв електронної техніки [11, 12].

На рис. 1, б наведено вольт-амперну характеристику (ВАХ) цього зразка. На ній можна побачити іншу особливість цих матеріалів — наявність гістерезису. Перемикання зразка з низькопровідного стану у високопровідний відбувається за більшої напруги, ніж зворотне перемикання. Використовуваний

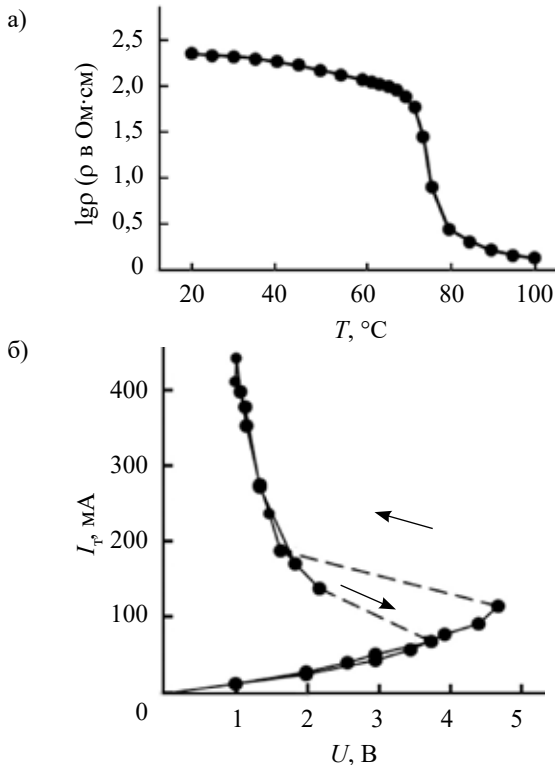


Рис. 1. Типова температурна залежність електричного опору ρ (а) та ВАХ (б) зразка склокераміки на основі діоксиду ванадію (на б стрілки вказують напрямок зміни напруги)

в цій роботі зразок склокераміки за кімнатної температури мав опір біля 70 Ом, а після перемикання у високопровідний стан — біля 0,5 Ом.

Методика проведення досліджень

Для реалізації термісторного захисту фотоелектричних елементів сонячних батарей від перегріву пропонується паралельне включення фотоелектричного елемента (PV) і терморезистора на основі склокераміки діоксиду ванадію з ФПМН із забезпеченням їх теплового контакту (рис. 2, 3). Терморезистори під час експерименту закріплювали до тильного боку фотоелементів. Для стійкої теплопередачі поверхні терморезистора та фотоелемента, що знаходяться в контакт, змащувалися кремнійорганічною теплопровідною пастою КПТ-8. У дослідженнях використовувалися PV-елементи з полікристалічного кремнію розмірами 150×50 мм.

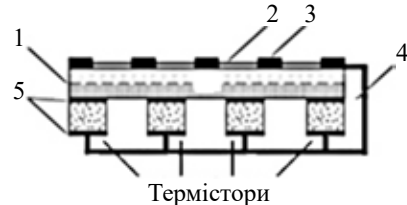


Рис. 2. Схематичне зображення досліджуваної структури: 1 — p-n-перехід фотоелектричного елемента; 2, 3 — прозвітлювальне покриття та металева сітка (електрод) фотоелектричного елемента; 4 — шар ізолятора; 5 — електропровідні шари

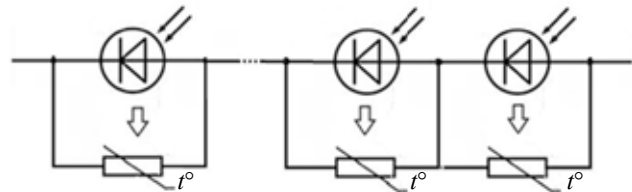


Рис. 3. Еквівалентна електрична схема досліджуваного сонячного модуля з захистом від перегріву

Для вимірювання ВАХ та кривої потужності $P(U)$ використовувалася відома вимірювальна схема вольтметра-амперметра [6, 11]. Роль навантаження виконував змінний резистор, джерела світла — імітатор сонячного випромінювання, який моделює умови АМ1,5. Для досліджень за підвищеної температури модель сонячної батареї поміщалася в розігрітій термостат, а після кожного такого вимірювання охолоджувалась до кімнатної температури у вільному режимі.

Результати досліджень та їх обговорення

На рис. 4 наведено отримані за кімнатної температури характеристики моделі сонячної батареї, яка складається з чотирьох послідовно включених PV-елементів. Тут видно, що наявність обвідного терморезисторного елемента в електричній схемі моделі сонячної батареї не впливає на її фотоелектричні характеристики у разі штатного температурного режиму всіх PV-елементів.

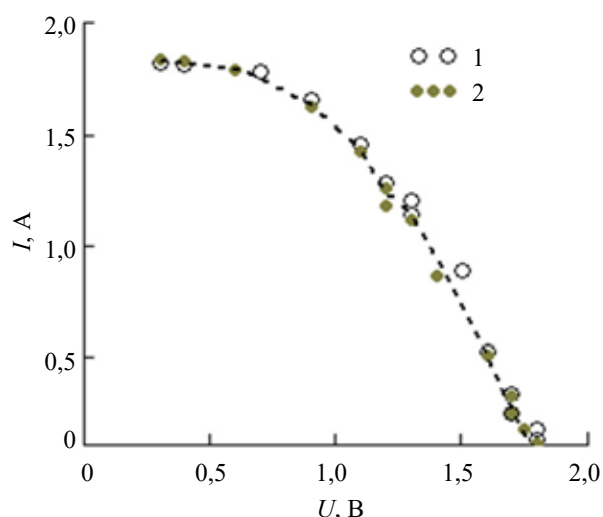


Рис. 4. ВАХ моделі сонячного модуля без (1) та з (2) терморезисторним елементом в умовах штатного температурного режиму всіх PV-елементів

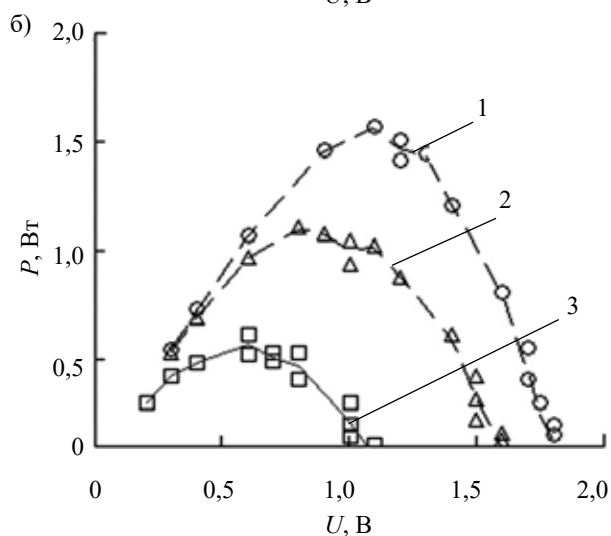
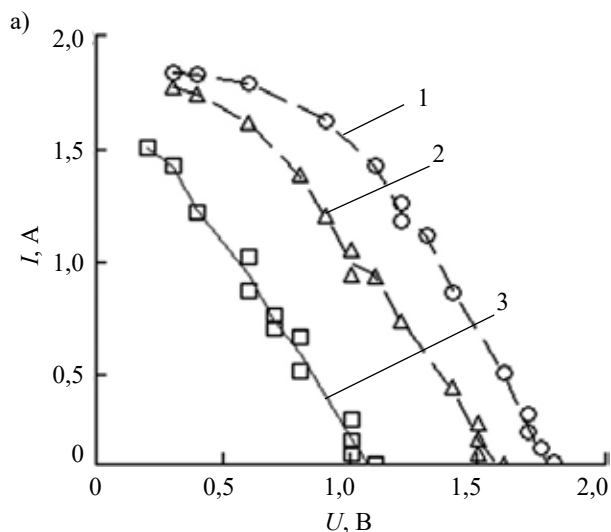


Рис. 5. ВАХ (а) та криві потужності P (б) моделі сонячного модуля з обвідними терморезисторами в штатному температурному режимі (1) та коли температуру, вищу за T_p , має один (2) та два (3) PV-елементи

На рис. 5 представлені характеристики моделі сонячної батареї у разі штатного температурного режиму всіх PV-елементів у порівнянні з випадками, коли температура одного з кіл «PV-елемент — терморезистор» вища за температуру переходу терморезистора у високопровідний (металевий) стан. На практиці такий стан може досягатися і через збільшення температури зазначеного кола, і через підігрів його електричним струмом. Як видно, така відмова (перегрів) окремих елементів призводить до тих самих результатів, що і при використанні механічного закорочування (викидання відповідного елемента або елементів із послідовного ланцюга). Результат той самий — зниження генерованої напруги та потужності.

Висновки

Результати проведених досліджень дозволяють зробити висновок, що пропонувані елементи захисту можуть функціонувати як багаторазові (самовідновлювальні) запобіжники електротеплових перевантажень в сонячних батареях, які реагують безпосередньо на досягнення граничної температури під час експлуатації фотоелектричних елементів. Застосування обвідних критичних терморезисторів в цьому випадку є ефективним з точки зору реалізації вбудованого захисту, що реагує безпосередньо на локальну температуру у разі перегріву фотоелемента, а також на перегріву, пов'язані з іншими причинами.

Пропонований підхід для запобігання перегріванню фотоелектричних елементів сонячних батарей, до надійності яких висуваються підвищені вимоги, представляється перспективним з огляду на відносну простоту технології виготовлення та невисоку вартість розглянутих склокерамічних матеріалів.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Aghaei M., Fairbrother A., Gok A. et al. Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 159, 112160. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112160>
2. Goudelis G., Lazaridis P. I., Dhimish M. A review of models for photovoltaic crack and hotspot prediction. *Energies*, 2022, vol. 15, iss. 12, 4303. <https://doi.org/10.3390/en15124303>
3. Kim K. A., Krein P. T. Reexamination of photovoltaic hot spotting to show inadequacy of the bypass diode. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2015, vol. 5, iss. 5, pp. 1435–1441. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2444091>
4. Dhimish M., Chen Zh. Novel Open-Circuit Photovoltaic Bypass Diode Fault Detection Algorithm. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2019, vol.9, iss. 6, pp. 1819–1827. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2940892>
5. Lee Ch. G., Shin W. G., Lim J. R. et al. Analysis of electrical and thermal characteristics of PV array under mismatching conditions caused by partial shading and short circuit failure of bypass diodes. *Energies*, 2021, vol. 228, iss. 1, 119480. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119480>
6. Guerriero P., Daliento S. A Power MOS based circuit for controlling the hot spot temperature in photovoltaic modules. *25th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC)*, 2019, Italy, Lecco, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/THERMINIC.2019.8923447>
7. Tang S., Xing Y., Chen L. et al. Review and a novel strategy for mitigating hot spot of PV panels. *Solar Energy*, 2021, vol. 214, iss. 15, p.51–61. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.047>

8. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Nakashydz L. V. et al. *Application of polymer posistor nano-composites in systems for protecting photovoltaic components of solar arrays from electrical overloads*. Monograph. Primedia eLaunch, Boston, USA, 2021, 172 p. <https://doi.org/10.46299/978-1-63972-054-5>

9. Тонкошкур О.С., Іванченко О.В. Застосування шару на основі матеріалів з фазовим переходом «метал — напівпровідник» для електротеплового захисту сонячних елементів. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2021, № 3–4, с. 57–64. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.3-4.57>

10. Колбунов В.Р., Тонкошкур О.С., Вашерук О.В. Електропровідність термочутливої склокераміки на основі нанороз-

мірного діоксиду ванадію. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2022, № 1–3. С. 39–41. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.1-3.39>

11. Ke Y., Wang S., Liu G. et al. Vanadium dioxide: The multistimuli responsive material and its applications. *Nano-Micro Small*, 2018, vol. 14, iss. 39, 1802025. <https://doi.org/10.1002/sml.201802025>

12. Ивон А.И., Кузьменко Е.Н. Использование критических терморезисторов для защиты процессора от перегрева. *Системные технологии*, 2007, т. 2, № 49, с. 25–32.

Дата надходження рукопису
до редакції 7.05 2023 р.

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.16
UDC 621.31

V. R. KOLBUNOV, O. S. TONKOSHKUR,
S. V. MAZURIK, A. Yu. LYASHKOV, L. V. NAKASHYDZE

Ukraine, Oles Honchar Dnipro National University
E-mail: kolbunov_vadim@i.ua

USING VANADIUM DIOXIDE CRITICAL THERMISTORS TO PROTECT SOLAR CELLS FROM OVERHEATING

The overheating caused by electrical loads is one of the essential factors impairing the reliability of photovoltaic components of solar cells. The most common technical solution to this problem is to use such additional elements as bypass diodes. However, the practice of installing such diodes in parallel with a chain of solar cells has shown that this approach does not eliminate hot spots completely, and thus characteristics of the solar cells deteriorate at a faster pace. One of the possible solutions to this problem is to use critical thermistors based on metal-semiconductor phase transition materials, such as vanadium dioxide. Structurally, such thermal protection is implemented by adding a separate photovoltaic element with a thermistor protection element that is in thermal contact with it. This study investigated the effectiveness of such a solution to prevent local overheating in photovoltaic components of solar cells. Glass-ceramic materials based on vanadium dioxide and vanadium-phosphate glass of the $V_2O_5-P_2O_5$ system were used as thermistor elements, which abruptly change the electrical resistance by 1.5–2.0 orders of magnitude in the temperature range around 70°C. The research results showed that the considered protective elements can function as reusable (self-healing) fuses against electrothermal overloads in solar batteries. Considering the relative simplicity and low cost of the manufacturing technology of glass-ceramic materials with a metal-semiconductor phase transition, the described approach to preventing overheating of photovoltaic cells of solar cells in situations with higher reliability requirements appears to be promising.

Keywords: critical thermistor, vanadium dioxide, photovoltaic element, local overheating.

REFERENCES

1. Aghaei M., Fairbrother A., Gok A. et al. Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 159, 112160. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112160>

2. Goudelis G., Lazaridis P. I., Dhimish M. A review of models for photovoltaic crack and hotspot prediction. *Energies*, 2022, vol. 15, iss. 12, 4303. <https://doi.org/10.3390/en15124303>

3. Kim K. A., Krein P. T. Reexamination of photovoltaic hot spotting to show inadequacy of the bypass diode. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2015, vol. 5, iss. 5, pp. 1435–1441. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2444091>

4. Dhimish M., Chen Zh. Novel Open-Circuit Photovoltaic Bypass Diode Fault Detection Algorithm. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2019, vol. 9, iss. 6, pp. 1819–1827. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2940892>

5. Lee Ch. G., Shin W. G., Lim J. R. et al. Analysis of electrical and thermal characteristics of PV array under mismatching conditions caused by partial shading and short circuit failure of bypass diodes. *Energies*, 2021, vol. 228, iss. 1, 119480. <https://doi.org/10.1016/j.ener.2020.119480>

6. Guerriero P., Daliento S. A Power MOS based circuit for controlling the hot spot temperature in photovoltaic modules. *25th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems*, 2019, Italy, Lecco, pp. 1–5, <https://doi.org/10.1109/THERMINIC.2019.8923447>

7. Tang S., Xing Y., Chen L. et al. Review and a novel strategy for mitigating hot spot of PV panels. *Solar Energy*, 2021, vol. 214, iss. 15, pp. 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.047>

8. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Nakashydz L. V. et al. *Application of polymer posistor nano-composites in systems for protecting photovoltaic components of solar arrays from electrical overloads*. Monograph. Primedia eLaunch, Boston, USA, 2021, 172 p. <https://doi.org/10.46299/978-1-63972-054-5>

9. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V. Using a layer based on materials with a metal to semiconductor phase transition for electrothermal protection of solar cells. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2021, no 3–4, pp. 57–64. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.3-4.57> (Ukr)

10. Kolbunov V. R., Tonkoshkur O. S., Vasheruk O. V. Electrical conductivity of thermosensitive glass-ceramics based on nanosized vanadium dioxide. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2022, no 1–3, pp. 39–43. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.1-3.39> (Ukr)

11. Ke Y., Wang S., Liu G. et al. Vanadium dioxide: The multistimuli responsive material and its applications. *Nano-Micro Small*, 2018, vol. 14, iss. 39, 1802025. <https://doi.org/10.1002/sml.201802025>

12. Ивон А.И., Кузьменко Е.Н. [Using critical thermistors to protect the processor from overheating]. *System Technologies*, 2007, vol. 2, no. 49, pp. 25–32. (Rus)

Опис статті для цитування:

Колбунов В. Р., Тонкошкур О. С., Мазурик С. В., Ляшков О. Ю., Накашидзе Л. В. Захист сонячних батареї від перегріву за допомогою критичних терморезисторів на основі діоксиду ванадію. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2023, № 3–4, с. 16–19. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.16>

Cite the article as:

Kolbunov V. R., Tonkoshkur O. S., Mazurik S. V., Lyashkov A. Yu., Nakashydz L. V. Using vanadium dioxide critical thermistors to protect solar cells from overheating. *Technology and design in electronic equipment*, 2023, no. 3–4, pp. 16–19. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.16>