

ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОТЕПЛОВОГО ЗАХИСТУ СОНЯЧНИХ МОДУЛІВ НА ОСНОВІ БАЙПАСНИХ КРИТИЧНИХ ТЕРМОРЕЗИСТОРІВ

Отримано 26 лют. 2024 р.; рекомендовано до публікації 22 бер. 2024 р.
Доступно онлайн 01 квіт. 2024 р.

Колбунов В. Р.¹, Тонкошкур О. С.²,
Накашидзе Л. В.³

Автор для кореспонденції: Накашидзе Лілія,
e-mail: foton_dnu@ukr.net

¹ канд. фіз.-мат. наук, доц.
<https://orcid.org/0000-0003-0430-1591>

² д-р фіз.-мат. наук, проф.
<https://orcid.org/0000-0002-1648-675X>

³ д-р техн. наук, старш. наук. співроб.
<https://orcid.org/0000-0003-3990-6718>

^{1,2,3} Дніпровський національний університет
імені Олеся Гончара

Анотація. Представлено результати експериментальних досліджень впливу особливостей параметрів електричного кола сонячного модуля на функціонування його пасивного фотоелемента з паралельно підключеним байпасним критичним терморезистором як методу підвищення надійності роботи сонячного модуля. Як терморезистор використовували склокерамічні матеріали на основі діоксиду ванадію та ванадій-фосфатного скла V2O5-P2O5, що стрибкоподібно змінюють величину електричного опору на 1,5–2 порядки в області температури 70 °С. Основну увагу приділено вивченню закономірностей поведінки функціональних електричних і теплових характеристик таких елементів від амплітуди перенапруги та опору навантаження.

Встановлено, що зі зростанням амплітуди перенапруги на пасивному (затіненому або пошкодженому) фотоелементі тривалість процесу перемикання байпасного терморезистора у високопровідний стан зменшується, падіння напруги після перемикання різко знижується (до величин, що не перевищують 2 В) та слабо змінюється. Збільшення опору навантаження зумовлює зниження струму через терморезистор і збільшення тривалості перехідного процесу. При тепловому контакті між пасивним фотоелементом і байпасним терморезистором перемикання спостерігається за менших перенапруг. За відсутності такого контакту температура, до якої нагрівається фотоелемент, у сталому стані змінюється несуттєво.

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

FEATURES OF ELECTRO-THERMAL PROTECTION OF SOLAR MODULES BASED ON BYPASS CRITICAL THERMORESISTORS

Received Feb. 26, 2024; accepted Mar. 22, 2024
Available online Apr. 01, 2024

Kolbunov V.¹, Tonkoshkur A.², Nakashydz L.³

Author for correspondence: Nakashydz Liliya,
e-mail: foton_dnu@ukr.net

¹ Cand.Sc.(Phys. and Math.), Asssoc. Prof.
<https://orcid.org/0000-0003-0430-1591>

² Dr. Sc. (Phys. and Math.), Prof.
<https://orcid.org/0000-0002-1648-675X>

³ Dr. Sc. (Eng.), Sen. Res.Fel.
<https://orcid.org/0000-0003-3990-6718>

^{1,2,3} Oles Honchar Dnipro National University,
Dnipro, Ukraine.

Abstract. The results of experimental research on the influence of the features of the electrical circuit parameters of the solar module on the functioning of its passive photocell with a parallel-connected bypass critical thermistor as a method of increasing the solar module reliability of are presented. Glass-ceramic materials based on vanadium dioxide and vanadium-phosphate glass V2O5-P2O5 were used as thermistor, which change the electrical resistance in leaps and

bounds by 1.5-2 orders of magnitude in the temperature range of 70 °C. The main attention is paid to the study of the patterns of behavior of the functional electrical and thermal characteristics of such elements depending on the amplitude of overvoltage and load resistance.

It was found that as the amplitude of the overvoltage on the passive (shaded or damaged) photocell increases, the duration of the process of switching the bypass thermistor to the highly conductive state decreases, the voltage drop after switching decreases sharply (to values not exceeding 2 V) and changes weakly. An increase in the load resistance leads to a decrease in the current through the thermistor and an increase in the duration of the transient process. With thermal contact between the passive photocell and the bypass thermistor, switching is observed at lower overvoltages. In the absence of such a contact, the temperature to which the photocell is heated changes insignificantly in a steady state.

Key words: solar module, photovoltaic cell, local overheating, critical thermistor, vanadium dioxide.

Вступ

Найвідомішим методом, що використовується для запобігання виникненню електричних перевантажень і перегрівів у модулях сонячних батарей (СБ), є включення пасивного байпасного (обвідного) діода паралельно до кола фотоелектричних сонячних елементів (ФЕ) [1, 2]. Однак дослідження систем з байпасними діодами показали, що перенапруги та «гарячі плями» все ж таки виникають, і це призводить до прискореного погіршення характеристик СБ. За допомогою методів моделювання та експериментальних досліджень визначено, що часткове затемнення кола ФЕ з обвідним діодом може призвести до розсіювання значної кількості тепла та формування «гарячих плям» [3–7].

Слід зазначити, що обвідні діоди, як і інші відомі схемотехнічні рішення (резисторні дільники, активні обвідні транзисторні перемикачі тощо) [8–11], реагують здебільшого на електричні перевантаження (здебільшого на перенапругу). Підвищення температури не є для них вхідним контрольованим параметром, призводить до наслідків, аналогічних перегріванню елементів, що захищаються. З цього погляду видається актуальним розроблення елементів захисту, які реагують безпосередньо на підвищення температури.

Склокерамічні терморезистивні матеріали на основі діоксиду ванадію видаються перспективними для вирішення таких завдань. Твердотільні елементи на основі цих матеріалів мають стрибкоподібну залежність електричної провідності від температури та перемикальну (S-подібну) вольт-амперну характеристику (ВАХ) [12–14]. Їх широко застосовують під час реалізації пристроїв автоматики, контролю, перемикачів і обмежувачів потужності, термоелектричних перетворювачів електричних і оптичних сигналів [15–20]. Їхні основні функціональні властивості: критичне зменшення опору при температурі фазового переходу метал-напівпровідник (ФПМН) у діоксиді ванадію ($T_t \approx 70^\circ\text{C}$) і перемикальна ВАХ є перспективними в сонячній енергетиці для підвищення відмовостійкості сонячних модулів [21, 22].

Для просування в цьому напрямі необхідні експериментальні дослідження впливу електричних і теплових умов на роботу байпасних терморезистивних систем

електротеплового захисту. Зокрема, актуальним є дослідження закономірностей поведінки їхніх функціональних електричних і теплових характеристик у разі зміни амплітуди перенапруги та внутрішнього опору джерела вхідної напруги, тепловіддачі в навколишнє середовище та її температури.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій

Аналіз даних літератури засвідчив, що використання критичних терморезисторів, описаних у [16, 19, 22, 23], як байпасних елементів є перспективним напрямом для захисту й забезпечення надійної роботи сонячних модулів. Наявність у послідовному колі пасивного ФЕ з підвищеним опором (затіненого, зіпсованого) перешкоджає проходженню струму через увесь сонячний модуль і віддачі його в навантаження. Крім цього, до пасивного ФЕ прикладається напруга, що генерується іншими активними фотоелементами, і це може призвести до його нагрівання і деградації.

У разі паралельного (байпасного) під'єднання критичного терморезистора до пасивного ФЕ терморезистор розігрівається від прикладеної перенапруги та переходить в стан з низьким (близьким до металічного) опором, що забезпечить протікання струму модуля через цю ділянку кола в навантаження, тобто забезпечить цьому модулю роботу в режимі генерації.

Розглянутий підхід до підвищення надійності роботи сонячних модулів застосовувався в дослідженнях у [21, 22]. При цьому основна увага була приділена обґрунтуванню самого принципу дії такого елемента захисту від перенапруги та перегрівів і можливості його застосування в сонячних фотоелектричних системах [22]. Однак завдання розроблення розглянутих пристроїв як засобів підвищення надійності функціонування сонячних фотоелектричних систем вимагають детального знання їхніх електричних і теплових характеристик та особливостей їх поведінки в різних умовах.

Мета роботи. Мета роботи – визначити закономірності поведінки функціональних електричних і теплових характеристик ФЕ й байпасного терморезистора під час зміни величини перенапруги, внутрішнього опору

джерела вхідної напруги, а також за наявності й відсутності теплового контакту між ними.

Результати дослідження та їх обговорення

Методика дослідження

У дослідженнях використовувалися зразки ФЕ з полікристалічного кремнію з геометричними розмірами 150 x 50 мм. Досліджували кінетику залежності струму $I(t)$ через опір навантаження R_{load} , падіння напруги $U(t)$ і температур послідовно з'єднаних фотоелектричного $T_1(t)$ та терморезисторного $T_2(t)$ елементів під час увімкнення перепаду постійної напруги E від 0 до 5–15 V. Відлік часу під час вимірювання релаксаційних залежностей здійснювався секундоміром.

Напруга, яка в реальних випадках виникає у сонячному модулі (послідовного з'єднання активних ФЕ) і прикладена до пасивного (неактивного, затіненого) фотоелемента з великим опором, імітувалася джерелом постійної напруги E .

Вимірювання температури здійснювали термопарами. При цьому виникали деякі проблеми, пов'язані з її градієнтом уздовж зразків як ФЕ, так і терморезисторного склокерамічного елемента на основі діоксиду ванадію [24] (його розміри: товщина 1,5 мм, діаметр 10 мм), а також впливом формування каналів високої провідності при ФПМН в останньому [25, 26]. У результаті термопари давали показання деякої середньої, зазвичай заниженої, температури. У зв'язку з цим, для терморезистивного елемента температура обчислювалася за значенням його опору з використанням попередньо виміряної температурної залежності електричного опору.

Кінетика електротеплових процесів у фотоелементі з байпасним терморезисторним елементом при перенапрузі

Експериментальні кінетичні залежності струму сонячного модуля, що містить пасивний ФЕ з великим опором і байпасним VO_2 -терморезистором, а також падіння напруги і температур цього ФЕ і терморезистора за умови застосування ступінчастої напруги E представлені на рис. 1.

Підключення постійної напруги E до пасивного ФЕ, достатньої для запуску процесу нагрівання байпасного терморезистора до температури ФПМН у діоксиді ванадію, зумовлює різке зростання струму та зменшення напруги. Цьому відповідає зростання потужності розсіювання як для ФЕ, так і для терморезистора. Збільшення температури призводить до зниження падіння напруги U на такому паралельному з'єднанні через зменшення його електричного опору та перерозподілу загальної напруги E між цим з'єднанням і послідовно включеним з ним опором навантаження R_{load} .

Слід зазначити, що розглянутий ефект має місце як у разі застосування теплоізолюваного від ФЕ обвідного терморезистора, так і для такого терморезистора з тепловим контактом з ФЕ. Для другого випадку цей процес реалізується за менших E і потребує меншого часу Δt_{tr} ,

оскільки терморезистор отримує додаткову теплову потужність від ФЕ, що перебуває з ним у тепловому контакті. Особливістю кінетичної залежності температури ФЕ за його термоізоляції від байпасного терморезистора (рис. 1, а) є зниження температури після переходу цього терморезистора у високопровідний стан. У результаті досягається стабільний стан з постійними значеннями струму, падіння напруги та температур ФЕ і терморезистора. При цьому падіння напруги та збільшення температури незначні для ФЕ. Таким чином реалізується його тепловий та електричний захист.

Слід зазначити, що розглянутий варіант конструкції захисту сонячного модуля від наявності ФЕ з підвищеним опором окремим обвідним терморезистором базується на саморозігріві зазначеного резистора за рахунок виділеної на ньому електричної потужності. Тобто для нього, як і для обвідних діодів, вхідними параметрами є електричні величини (сила струму або перенапруга).

Однак базова властивість терморезистора реагувати на підвищення температури дає змогу реалізувати конструкції, вхідними параметрами яких можуть виступати теплові чинники [22].

Вплив параметрів електричного кола на функціональні властивості фотоелемента з байпасним терморезисторним елементом

На рис. 2 наведено залежності сталих значень струму, що віддається в навантаження I_{st} , падіння напруги U_{st} , температур ФЕ і терморезистора T_{st} , а також тривалості перехідного процесу для досягнення цих значень Δt_{tr} від прикладеної напруги E .

Як видно, має місце стрибкоподібна зміна таких функціональних електричних параметрів: струму, що віддається в навантаження модуля, і падіння напруги на пасивному ФЕ. Температура ФЕ в разі його ізоляції від обвідного терморезистора зменшується до деякого невисокого постійного значення. Залежність температури терморезистора від E відповідає зростаючій функції. Тривалість перехідного процесу Δt_{tr} може бути фіксованою для E , які відповідають генерованій модулем напрузі, достатній для розігрівання терморезисторного елемента до температури ФПМН. Зі зростанням E час спрацьовування обвідного терморезистора скорочується.

Відповідно до вищевикладеного зменшення перенапруги, прикладеної до паралельного з'єднання ФЕ–терморезистор, і зростання струму через нього пов'язане з критичним зменшенням електричного опору під час його розігріву останнім. Як видно з наведених тут результатів досліджень, усталені значення струму через байпасний терморезистор можуть досягати значної величини. Ця величина визначається послідовно ввімкненими внутрішнім опором джерела живлення R_s і опором навантаження R_{load} . Внутрішній опір R_s активної (освітленої) частини сонячного модуля малий (до декількох Ом [27]). Отже, основним струмообмежувальним резистивним елементом можна вважати опір R_{load} .

Збільшення R_{load} (та/або R_s) веде до зменшення струму і потужності, що розсіюється терморезистором (і ФЕ в разі наявності теплового контакту між ними), що може призвести до його охолодження і збільшення його опору. В результаті може спостерігатися перерозподіл напруги в розглянутому колі таким чином, що частина, яка

прикладається до ФЕ і до відповідного байпасного терморезистора, буде слабо змінюватися. У підсумку це призводить до закономірностей для сталих значень $I_{st}(R_{load})$ і $U_{st}(R_{load})$, представлених на рис. 3. Як видно, зі збільшенням R_{load} має місце збільшення тривалості перехідного процесу, зумовленого ФПМН у терморезисторі.

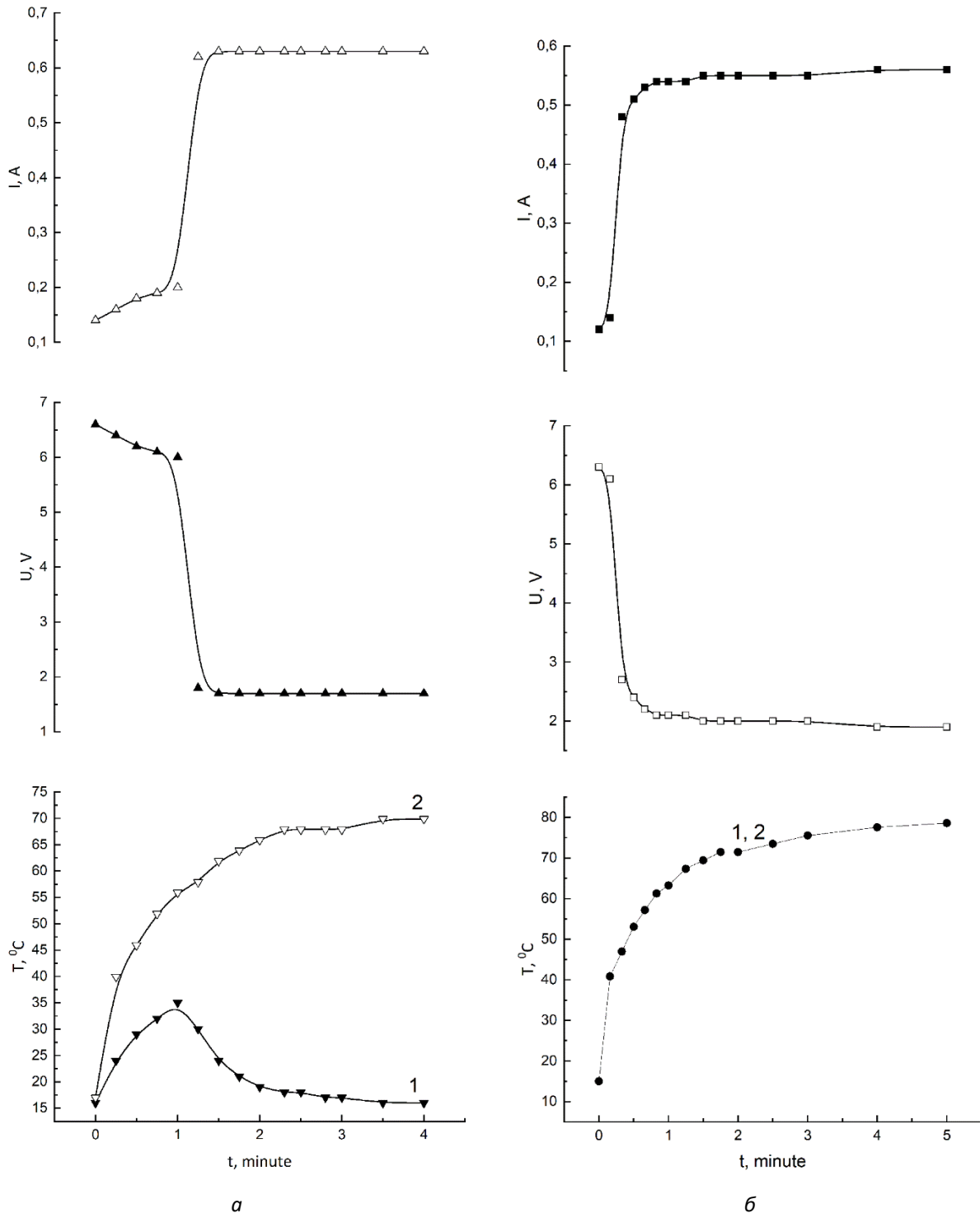


Рис. 1. Залежності струму ФЕ (I), падіння напруги на пасивному ФЕ з більшим опором (U) та температур T ФЕ (крива 1) і терморезистора (2) від часу для паралельного з'єднання ФЕ–байпасний терморезистор без теплового контакту (а, напруга джерела живлення $E = 8\text{ V}$) і з ним (б, $E = 7,5\text{ V}$)

Fig. 1. Dependencies of PV current (I), voltage drop on passive PV with higher resistance (U) and temperatures T of PV (curve 1) and thermistor (2) on time for parallel connection of PE-bypass thermistor without thermal contact (а, power supply voltage $E = 8\text{ V}$) and with it (б, $E = 7,5\text{ V}$)

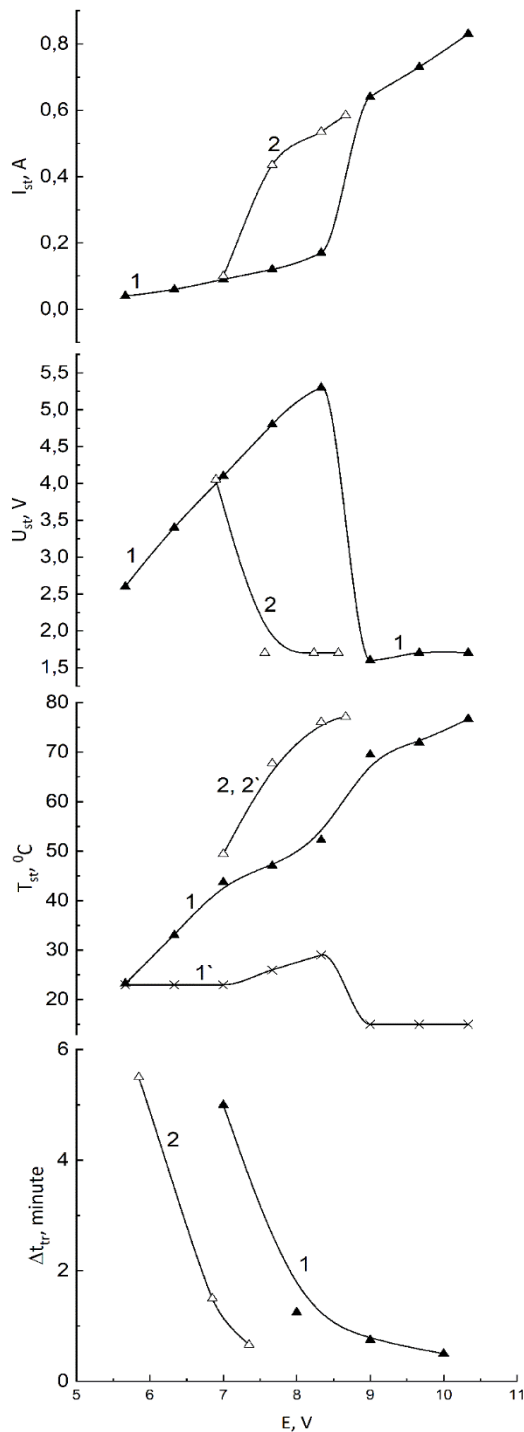


Рис. 2. Залежності сталих значень струму опору навантаження I_{st} , падіння напруги на ФЕ з більшим опором U_{st} , температур ФЕ (криві 1' і 2') і байпасного терморезистора T_{st} (1 і 2) та часу спрацювання терморезистора Δt_{tr} від перенапруги E . Криві 1, 1' та 2, 2' відповідають системам ФЕ–терморезистор без теплового контакту і з ним

Fig. 2. Dependencies of the constant values of the load resistance current I_{st} , the voltage drop on the PV with a higher resistance U_{st} , the temperatures of the PV (curves 1' and 2') and the bypass thermistor T_{st} (1 and 2) and the thermistor activation time Δt_{tr} from overvoltage E . Curves 1, 1' and 2, 2' correspond to PV–thermoresistor systems without and with thermal contact

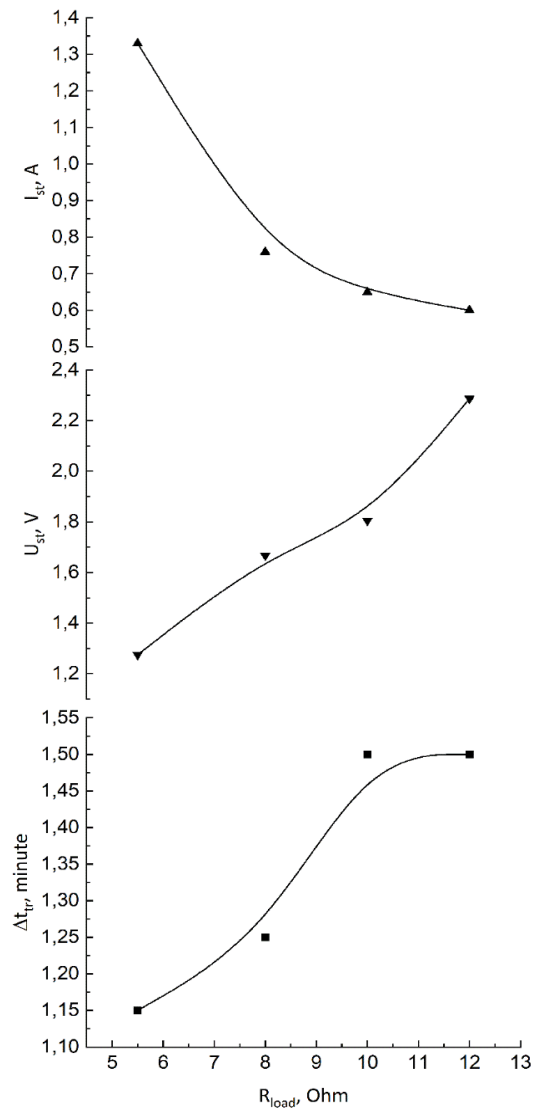


Рис. 3. Залежності сталих після спрацювання байпасного терморезистора значень струму опору навантаження I_{st} , падіння напруги на ФЕ U_{st} і часу спрацювання терморезистора Δt_{tr} для системи ФЕ–терморезистор без теплового контакту, від опору навантаження R_{Load}

Fig. 3. Dependencies of constant values of load resistance current I_{st} , voltage drop across PV U_{st} and thermoresistor activation time Δt_{tr} for a PV–thermoresistor system without thermal contact, on load resistance R_{Load} after activation of bypass thermistor

Висновки

У роботі представлено результати експериментальних досліджень закономірностей поведінки функціональних електричних і теплових характеристик ФЕ з полікристалічного кремнію та байпасного склокерамічного терморезистора на основі діоксиду ванадію під час зміни параметрів електричного кола.

Встановлено, що за наявності електричних перенапруг:

- тривалість процесу перемикання байпасного терморезистора у високопровідний стан зменшується зі зростанням амплітуди перенапруги на пасивному

(затіненому або пошкодженому) ФЕ, що має великий опір;

- падіння напруги на пасивному ФЕ після зазначеного перемикання різко знижується (до величин, що не перевищують 2 V) і слабо залежить від величини перенапруги;
- збільшення опору навантаження зумовлює зниження струму переключеного терморезистора і збільшення тривалості перехідного процесу;
- за наявності теплового контакту між пасивним ФЕ і байпасним терморезистором перехід останнього у високопровідний стан спостерігається за менших перенапруг, а за відсутності такого контакту температура, до якої нагрівається ФЕ, у сталому стані змінюється незначно.

ПОСИЛАННЯ

1. Vieira R. G., de Araújo F. M., Dhimish M., Guerra M. I. A comprehensive review on bypass diode application on photovoltaic modules. *Energies*. 2020. No. 13(10). P. 2472. <https://doi.org/10.3390/en13102472>
2. Kreft W., Przenzak E., Filipowicz M. Photovoltaic chain operation analysis in condition of partial shading for systems with and without bypass diodes. *Optik*. 2021. No. 247. P. 167840. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167840>
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. P. 1435–1441. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2444091>
4. Humaid V., Kumar M., Gupta R. Bypass diode effect on temperature distribution in crystalline silicon photovoltaic module under partial shading. *Solar Energy*. 2020. Vol. 208. P. 182–194. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.087>
5. Teo J. C., Tan R. H., Mok V. H., Ramachandramurthy V. K., Tan C. Impact of bypass diode forward voltage on maximum power of a photovoltaic system under partial shading conditions. *Energy*. 2020. No. 191. P. 116491. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116491>
6. Satpathy P. R., Bhowmik P., Babu T. S., Sharma R., Sain C. Bypass Diodes Configurations for Mismatch Losses Mitigation in Solar PV Modules. In *Innovation in Electrical Power Engineering, Communication, and Computing Technology: Proceedings of Second IEPCCCT 2021*. 2022. P. 197–208. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7076-3_18
7. Lee C. G., Shin W. G., Lim J. R., Kang G. H., Ju Y. C., Hwang H. M., Ko S. W. Analysis of electrical and thermal characteristics of PV array under mismatching conditions caused by partial shading and short circuit failure of bypass diodes. *Energy*. 2021. Vol. 218. P. 119480. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119480>
8. Tang S., Xing Y., Chen L., Song X., Yao F. Review and a novel strategy for mitigating hot spot of PV panels. *Solar Energy*. 2021. Vol. 214. P. 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.047>
9. Guerriero P., Tricoli P., Daliento S. A bypass circuit for avoiding the hot spot in PV modules. *Solar Energy*. 2019. Vol. 181. P. 430–438. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.010>
10. 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. Lecco, Italy. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/THERMINIC.2019.8923447>
11. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Nakashydz L. V., Lyashkov A. Yu., Gomilko I. V. 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>
12. Bruckner W., Opperman H., Reihelt W., Terukow J. I., Tschudnowski F. A., Wolf E. Vanadiumoxide: Darstellung, Eigenschaften, Anwendung. Berlin: Akademie-Verlag. 1983. 252 p.
13. Pergament A. L., Stefanovich G. B., Velichko A. A. Oxide electronics and vanadium dioxide perspective: A review. *Journal on Selected Topics in Nano Electronics and Computing*. 2013. Vol. 1. No. 1. P. 24–43. <https://doi.org/10.15393/j8.art.2013.3002>
14. Liu K., Lee S., Yang S., Delaire O., Wu J. Recent progresses on physics and applications of vanadium dioxide. *Materials Today*. 2018. No. 21(8). P. 875–896. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2018.03.029>
15. Givernaud J., Crunteanu A., Orlianges J. C. et al. Microwave power limiting devices based on the semiconductor-metal transition in vanadium-dioxide thin films. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2010 Vol. 58. No. 9. P. 2352–2361. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2010.205717>
16. Pan K., Wang W., Shin E. et al. Vanadium oxide thin-film variable resistor-based RF switches. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2015. Vol. 62. No. 9. P. 2959–2965. <https://doi.org/10.1109/TED.2015.2451993>
17. Soltani M., Kaye A. B. Properties and applications of thermochromic vanadium dioxide smart coatings. In book: *Intelligent Coatings for Corrosion Control*. Butterworth-Heinemann. 2015. P. 461–490. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411467-8.00013-1>

18. Li L., Wang W., Shin E. et al. Design of tunable shunt and series interdigital capacitors based on vanadium dioxide thin film. Proceedings of 2017 IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON). USA, OH, Dayton. 2017. P. 279–283.
<https://doi.org/10.1109/NAECON.2017.8268785>
19. Ke Y., Wang S., Liu, G., Li M., White T. J., Long Y. Vanadium dioxide: The multistimuli responsive material and its applications. *Small*. 2018. Vol. 14(39). P. 1802025.
<https://doi.org/10.1002/sml.201870178>
20. Nordquist C. D., Leonhardt D., Custer J. O. et al. Power handling of vanadium dioxide metal-insulator transition RF limiters. Proceedings of 2018 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP). USA, MI, Ann Arbor. 2018. P. 1–3.
<https://doi.org/10.1109/IMWS-AMP.2018.8457150>
21. Тонкошкур О. С., Іванченко О. В. Застосування шару на основі матеріалів з фазовим переходом «метал-напівпровідник» для електротеплового захисту сонячних елементів. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*. 2021. No. 3-4, с. 57–64. (Ukr)
<http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.3-4.57>
22. Колбунов В. Р., Тонкошкур О. С., Мазурик С. В., Ляшков О. Ю., Накашидзе Л. В. Захист сонячних батарей від перегріву за допомогою критичних терморезисторів на основі діоксиду ванадію. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*. 2023. № 3-4. С. 16–19. (Ukr). <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.1>
23. Zhang Y., Xiong W., Chen W., Zheng Y. Recent progress on vanadium dioxide nanostructures and devices: Fabrication, properties, applications and perspectives. *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11(2). P. 338.
<https://doi.org/10.3390/nano11020338>
24. Колбунов В. Р., Тонкошкур О. С., Вашерук О. В. Електропровідність термочутливої склокераміки на основі нанорозмірного діоксиду ванадію. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*. 2022. № 1–3. с. 39–41. (Ukr)
<http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.1-3.39>
25. Ivon A. I., Chernenko I.M., Kolbunov V. R., Mozhorovsky L. A. The size effect in current-voltage characteristic of VO₂-based ceramics in the on-state. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2007. Vol. 18, No. 10. P. 1009–1012.
<https://doi.org/10.1007/s10854-006-9106-3>
26. Köntges M., Kurtz S., Packard C. et al. Review of failures of photovoltaic modules. IEA PVPS Task 13. 2014. 132 p.
27. Singh R., Sharma M., Rawat R., Banerjee C. An assessment of series resistance estimation techniques for different silicon based SPV modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. No. 98. P. 199–216.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.020>

REFERENCES

1. Vieira R. G., de Araújo F. M., Dhinish M., Guerra M. I. A comprehensive review on bypass diode application on photovoltaic modules. *Energies*. 2020. No. 13(10). P. 2472. <https://doi.org/10.3390/en13102472>
2. Kreft W., Przenzak E., Filipowicz M. Photovoltaic chain operation analysis in condition of partial shading for systems with and without bypass diodes. *Optik*. 2021. No. 247. P. 167840.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167840>
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. P. 1435–1441.
<https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2444091>
4. Humaid V., Kumar M., Gupta R. Bypass diode effect on temperature distribution in crystalline silicon photovoltaic module under partial shading. *Solar Energy*. 2020. Vol. 208. P. 182–194.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.087>
5. Teo J. C., Tan R. H., Mok V. H., Ramachandaramurthy V. K., Tan C. Impact of bypass diode forward voltage on maximum power of a photovoltaic system under partial shading conditions. *Energy*. 2020. No. 191. P. 116491.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116491>
6. Satpathy P. R., Bhowmik P., Babu T. S., Sharma R., Sain C. Bypass Diodes Configurations for Mismatch Losses Mitigation in Solar PV Modules. In *Innovation in Electrical Power Engineering, Communication, and Computing Technology: Proceedings of Second IEPCCCT 2021*. 2022. P. 197–208. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7076-3_18
7. Lee C. G., Shin W. G., Lim J. R., Kang G. H., Ju Y. C., Hwang H. M., Ko S. W. Analysis of electrical and thermal characteristics of PV array under mismatching conditions caused by partial shading and short circuit failure of bypass diodes. *Energy*. 2021. Vol. 218. P. 119480. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119480>
8. Tang S., Xing Y., Chen L., Song X., Yao F. Review and a novel strategy for mitigating hot spot of PV panels. *Solar Energy*. 2021. Vol. 214. P. 51–61.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.047>
9. Guerriero P., Tricoli P., Daliento S. A bypass circuit for avoiding the hot spot in PV modules. *Solar Energy*. 2019. Vol. 181. P. 430–438.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.010>
10. 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. Lecco, Italy. P. 1–5.
<https://doi.org/10.1109/THERMINIC.2019.8923447>

11. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Nakashydz L. V., Lyashkov A. Yu., Gomilko I. V. 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>
12. Bruckner W., Opperman H., Reihelt W., Terukow J. I., Tschudnowski F. A., Wolf E. Vanadiumoxide: Darstellung, Eigenschaften, Anwendung. Berlin: Akademie-Verlag. 1983. 252 p.
13. Pergament A. L., Stefanovich G. B., Velichko A. A. Oxide electronics and vanadium dioxide perspective: A review. Journal on Selected Topics in Nano Electronics and Computing. 2013. Vol. 1. No. 1. P. 24–43. <https://doi.org/10.15393/j8.art.2013.3002>
14. Liu K., Lee S., Yang S., Delaire O., Wu J. Recent progresses on physics and applications of vanadium dioxide. Materials Today. 2018. No. 21(8). P. 875–896. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2018.03.029>
15. Givernaud J., Crunteanu A., Orlanges J. C. et al. Microwave power limiting devices based on the semiconductor-metal transition in vanadium-dioxide thin films. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2010 Vol. 58. No. 9. P. 2352–2361. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2010.205717>
16. Pan K., Wang W., Shin E. et al. Vanadium oxide thin-film variable resistor-based RF switches. IEEE Transactions on Electron Devices. 2015. Vol. 62. No. 9. P. 2959–2965. <https://doi.org/10.1109/TED.2015.2451993>
17. Soltani M., Kaye A. B. Properties and applications of thermochromic vanadium dioxide smart coatings. In book: Intelligent Coatings for Corrosion Control. Butterworth-Heinemann. 2015. P. 461–490. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411467-8.00013-1>
18. Li L., Wang W., Shin E. et al. Design of tunable shunt and series interdigital capacitors based on vanadium dioxide thin film. Proceedings of 2017 IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON). USA, OH, Dayton. 2017. P. 279–283. <https://doi.org/10.1109/NAECON.2017.8268785>
19. Ke Y., Wang S., Liu G., Li M., White T. J., Long Y. Vanadium dioxide: The multistimuli responsive material and its applications. Small. 2018. Vol. 14(39). P. 1802025. <https://doi.org/10.1002/sml.201870178>
20. Nordquist C. D., Leonhardt D., Custer J. O. et al. Power handling of vanadium dioxide metal-insulator transition RF limiters. Proceedings of 2018 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP). USA, MI, Ann Arbor. 2018. P. 1–3. <https://doi.org/10.1109/IMWS-AMP.2018.8457150>
21. Tonkoshkur O. S., Ivanchenko O. V. Application of a layer based on materials with a "metal-semiconductor" phase transition for electrothermal protection of solar cells. Technology and design in electronic equipment. 2021. No. 3-4, c. 57–64. (Ukr) <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.3-4.57>
22. Kolbunov V. R., Tonkoshkur A. S., Mazurik S. V., Lyashkov O.Yu., Nakashydz L. V. Protection of solar cells from overheating using critical thermistors based on vanadium dioxide. Technology and design in electronic equipment. 2023. № 3-4. C. 16–19. (Ukr). <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.1>
23. Zhang Y., Xiong W., Chen W., Zheng Y. Recent progress on vanadium dioxide nanostructures and devices: Fabrication, properties, applications and perspectives. Nanomaterials. 2021. Vol. 11(2). P. 338. <https://doi.org/10.3390/nano11020338>
24. Kolbunov V. R., Tonkoshkur A. S., Vasheruk O. V. Electrical conductivity of thermosensitive glass ceramics based on nanosized vanadium dioxide. Technology and design in electronic equipment. 2022. № 1–3. c. 39–41. (Ukr) <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.1-3.39>
25. Ivon A. I., Chernenko I.M., Kolbunov V. R., Mozhorovsky L. A. The size effect in current-voltage characteristic of VO₂-based ceramics in the on-state. Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2007. Vol. 18, No. 10. P. 1009–1012. <https://doi.org/10.1007/s10854-006-9106-3>
26. Köntges M., Kurtz S., Packard C. et al. Review of failures of photovoltaic modules. IEA PVPS Task 13. 2014. 132 p.
27. Singh R., Sharma M., Rawat R., Banerjee C. An assessment of series resistance estimation techniques for different silicon based SPV modules. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. No. 98. P. 199–216. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.020>