

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ОЛЕСЯ ГОНЧАРА

**В.Р. Колбунов, О.С. Тонкошкур,
Л.В. Накашидзе**

**ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ
БАЙПАСНИХ ТЕРМОРЕЗИСТОРНИХ
ЕЛЕМЕНТІВ В ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ
МОДУЛЯХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ**

Монографія

**Дніпро
2025**

УДК 621.311.243-049.65(02.064)

К63

Друкується відповідно до рішення Вченої Ради Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара (протокол № 7 від 20.02.2025)

Рецензенти:

Олександр Коваленко – доктор фіз.-мат. наук., професор, завідувач кафедри прикладної радіофізики, електроніки та наноматеріалів Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара

Сергій Плаксін – доктор фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб., завідувач відділу систем керування інституту транспортних систем і технологій НАН України

Володимир Гаврилюк - доктор фіз.-мат. наук., професор, завідувач кафедри автоматичної та телекомунікацій Дніпровського інституту інфраструктури і транспорту Українського державного університету науки і технологій

К 63 Колбунов В.Р.

Перспективи використання байпасних терморезисторних елементів в фотоелектричних модулях сонячних батарей: монографія. В. Р. Колбунов, О. С. Тонкошкур, Л. В. Накашідзе Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара. Дніпро: ТОВ «Акцент ПП», 2025. - 128 с.

Досліджена та обґрунтована концепція захисту фотоелектричних компонентів сонячних батарей від електротеплових перевантажень шляхом використання байпасних (обвідних) терморезисторних елементів на основі матеріалів з фазовим переходом метал-ізолятор. Проаналізовано можливості технічного забезпечення пропонованого підходу для підвищення надійності функціонування фотоелектричних модулів сонячних батарей у різних умовах. Проведено детальний аналіз фізико-технологічних властивостей терморезистивних елементів на основі ванадієво-діоксидної склокераміки, що стосуються таких аспектів як стабільність та технологічне зменшення температури фазового переходу метал-ізолятор.

ISBN 978-966-921-365-5

К 63 Kolbunov V. R.

Prospects for the use of bypass thermistor elements in photovoltaic modules of solar batteries: monograph. / V. R. Kolbunov, A. S. Tonkoshkur, L. V. Nakashydzhe, Oles Honchar Dnipro National University. Dnipro: LLC "Accent PP", 2025. - 128 p.

The concept of protecting photovoltaic components of solar batteries from electrothermal overloads by utilising thermistor bypass elements based on materials exhibiting a metal-insulator phase transition has been subjected to extensive research and has been demonstrated to be a viable approach. This study examines the potential for technical assistance in enhancing the dependability of photovoltaic modules in solar batteries under diverse circumstances. Particular emphasis is placed on the examination of the physical and technological characteristics of thermoresistive elements based on vanadium dioxide glass ceramics, with a focus on aspects such as stability and the technological shift of the metal-insulator phase transition temperature.

УДК 621.311.243-049.65(02.064)

ISBN 978-966-921-365-5

В.Р. Колбунов, О.С. Тонкошкур, Л.В. Накашідзе, 2025

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
Перелік використаних літературних джерел до вступу	10
Розділ 1. СУЧАСНІ ЗАСОБИ ЗАХИСТУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ КОМПОНЕНТІВ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ ВІД ЕЛЕКТРОТЕПЛОВИХ ПЕРЕНАВАНТАЖЕНЬ	14
1.1 Оптимальне реконструювання топології фотоелектричних систем сонячної батареї	14
1.1.1. Основні типи топології масиву фотоелектричних модулів	14
1.1.2. Підвищення ефективності фотоелектричних систем за рахунок їх топології	17
1.2 Методи з використанням додаткових спеціальних пристроїв	20
1.2.1. Загальні засоби захисту від електричних перенавантажень сонячних електростанцій	20
1.2.1.1. Байпасні діоди та принцип їх дії	21
1.2.1.2. Особливості формування «гарячих плям» в фотоелектричних модулях з байпасними діодами	23
1.2.2. Схемотехнічні методи запобігання появи «гарячих плям»	25
1.2.2.1. Активні обвідні перемикачі . .	25
1.2.2.2. Методи виявлення та активного захисту	28
1.2.2.3. Використання фотоелектричних елементів з низьким опором зворотного пробою	32

1.2.2.4.	Функціональні характеристики твердотільних двокомпонентних варисторно- позисторних самовідновлюваних обмежувачів напруги та їх особливості	32
1.2.3.	Перспективи застосування байпасних елементів на основі критичних терморезисторів	36
	Перелік використаних літературних джерел до розділу 1	37
	Розділ 2. ТЕРМОРЕЗИСТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ НА ОСНОВІ ДІОКСИДУ ВАНАДІЮ ТА ЇХ ФІЗИКО- ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ	46
2.1	Фазовий перехід метал-ізолятор в діоксиді ванадію	46
2.2	Терморезистивний матеріал на основі склокераміки VO_2 -ВФС-Cu та особливостями технології його виготовлення	50
2.3	Модель електропровідності кераміки на основі VO_2 і стекол системи V_2O_5 - P_2O_5	57
2.4	Електропровідність склокераміки систем VO_2 -ВФС-МО та VO_2 -ВФС-Cu-МО на постійному струмі	63
2.5	Кінетика струму в критичних терморезисторах на основі діоксиду ванадію	72
	2.5.1. Затримка ввімкнення	74
	2.5.2. Кінетика вимкнення	80
	Перелік використаних літературних джерел до розділу 2	83

Розділ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОРЕЗИСТОРІВ НА ОСНОВІ ДІОКСИДУ ВАНАДІЮ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ ЕЛЕКТРОТЕПЛОВИХ ПЕРЕНАВАНТАЖЕНЬ У ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ КОМПОНЕНТАХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ	90
3.1 Параметри та технічні характеристики . використаних терморезисторів	91
3.2 Вплив підвищених температур на вольт- . амперні характеристики сонячного модуля з підключеним терморезистором	93
3.2.1. Методика дослідження ефективності застосування критичних терморезисторів	93
3.2.2. Вплив терморезистора на фотоелектричні характеристики моделі сонячного модуля	95
3.3 Вплив електричної перенапруги та підвищених . температур на електричні характеристики окремого фотоелектричного елемента	97
3.3.1. Методика досліджень	97
3.3.2. Вплив байпасного терморезистора на електричні характеристики фотоелектричного елемента з високим опором	98
3.4 Електричні характеристики фотоелектричного . елемента з високим опором у тепловому контакті з терморезистором	101
Перелік використаних літературних джерел до розділу 3	104
Розділ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕРМОРЕЗИСТОРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В ЯКОСТІ БАЙПАСНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У СОНЯЧНИХ МОДУЛЯХ	106

4.1	Системи сонячний модуль (підмодуль)- ізолюваний терморезистор	106
4.1.1.	Фізичні основи	106
4.1.2.	Рівняння моделі	107
4.1.3.	Порівняння розрахункових та експериментальних даних	110
4.2	Аналіз впливу особливостей електричного та теплого режиму на властивості фотоелемента з байпасним терморезистором. . .	112
4.2.1.	Вплив величини перенапруги	112
4.2.2.	Залежність від опору навантаження . . .	117
4.2.3.	Оцінка швидкодії	121
	Перелік використаних літературних джерел до розділу 4	122
	ВИСНОВКИ	125

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ВФС	– ванадієво-фосфатне скло;
ОН	– обмежувач напруги;
РФА	– рентгенофазовий аналіз;
ФЕ	– фотоелектричний елемент;
ФПМІ	– фазовий перехід метал – ізолятор;
DC-	– імпульсний перетворювач постійної напруги (DC)
DC	однієї величини до постійної напруги (DC) іншої величини;
MPP	– точка максимальної потужності [maximum power point];
MPPT	– відстеження точки максимальної потужності [MPP tracking];
Pa	– паралельна топологія фотоелектричної матриці;
PLC	– зв'язок лініями електропередач [Power Line Communication];
PPTC	– полімерний запобіжник з позитивним температурним коефіцієнтом опору [Polymeric Positive Temperature Coefficient (fuse)];
Se	– послідовна топологія фотоелектричної матриці;
Se-Pa	– послідовно-паралельна топологія фотоелектричної матриці;
SMSC	– пристрій захисту окремого фотоелектричного модуля;
$\sigma(T)$	– температурна залежність електропровідності;
T_{tr}	– температура фазового переходу метал – ізолятор;
E_{tr}	– напруга, яка відповідає підвищенню температури терморезистора до точки ФПМІ;
R_E	– внутрішній електричний опір джерела живлення;
R_L	– електричний опір навантаження;
Δt_{tr}	– час спрацьовування байпасного терморезисторного елемента.

ВСТУП

Однією з основних причин суттєвого погіршення надійності фотоелектричних компонентів сонячних батарей є виникнення електричних перевантажень та відповідних їм перегрівів. Фізичними причинами таких ситуацій можуть бути загінення окремих фотоелектричних елементів, пошкодження їх та інших складових частин сонячних панелей у процесі експлуатації, приховані виробничі дефекти або результати деградації ізоляції під дією навколишнього середовища [1 – 5].

Такі перегріви, названі «гарячими плямами», знижують ефективність генерування електроенергії фотоелектричними елементами, прискорюють старіння та часто спричиняють руйнування фотоелектричних кіл.

Нині відомі два основні напрямки вирішення проблеми захисту фотоелектричних компонентів сонячних батарей від електротеплових перевантажень [6].

Перший напрям – це оптимальне реконструювання топології сонячної батареї (масиву), для зменшення або уникнення розсіювання потужності осередків з «гарячими плямами» [7, 8]. Однак, цю стратегію реконструкції можна використовувати лише для пом'якшення наслідків «гарячих плям», спричинених невідповідністю між фотоелектричними модулями.

Інший напрям – це зменшення кількості «гарячих плям» у фотоелектричному модулі пасивними або активними методами за рахунок використання спеціалізованих пристроїв, які увімкнені послідовно та/або паралельно. Цей підхід вважається більш ефективним, ніж перший напрям [9].

До пасивних методів можна зарахувати традиційний підхід, за якого фотоелектричний модуль під'єднують паралельно з байпасним діодом та використання фотоелектричних елементів із низькою напругою зворотного пробую [10].

Активні методи базуються, як правило, на використанні транзисторних схем. Серед них схема з

силовим МОН-транзистором, увімкненим послідовно з фотоелектричними модулями. Така схема була запропонована в [11] для зменшення зворотної напруги та втрат потужності, спричинених «гарячими плямами». Також запропоновані схеми з потужними МОН-транзисторами та біполярним транзистором [11 – 13] для покращання ефективності пом'якшення впливу «гарячих плям». У таких методах використовується підхід, заснований на розмиканні підрядка сонячного модуля з затіненими фотоелектричними елементами [10, 14].

У низці робіт [4, 5, 15, 16] розглянуто можливості застосування для пасивного електротеплового захисту від виникнення «гарячих плям» твердотільних двокомпонентних шаруватих варисторно-позисторних структур шляхом блокування рядків із затіненими (або пошкодженими) фотоелектричними елементами.

На сьогодні найпоширенішим технічним рішенням цих проблем є включення додаткових елементів – байпасних (обвідних) діодів. Однак практика встановлення паралельно ланцюжку фотоелектричних елементів таких діодів засвідчила, що «гарячі плями» все ж таки виникають і це призводить до прискореного погіршення характеристик сонячних батарей. Байпасні діоди найефективніші для запобігання виникнення «гарячих плям» при коротких послідовностях у ланцюжку фотоелектричних елементів, але такі конструкції не застосовуються в сучасних фотоелектричних модулях з економічних міркувань [10, 18 – 20].

З іншого боку, вони, як і інші раніше згадані схемотехнічні рішення, реагують здебільшого на електричні перевантаження (як правило, на перенапругу). Підвищення температури не є для них вхідним контрольованим параметром і призводить до наслідків аналогічних до перегріву елементів, що захищаються. З цього погляду, актуальним є розроблення елементів захисту, які реагують безпосередньо на підвищення температури.

Одним із можливих рішень такого завдання є використання терморезисторів на основі матеріалів із

фазовим переходом метал–ізолятор (ФПМІ), що розглянуто теоретично в [21]. Ці твердотільні елементи мають стрибкоподібну залежність електричної провідності при досягненні відповідної температури фазового переходу.

Якщо такий терморезистор під'єднано паралельно до фотоелектричного елемента з підвищеним опором, на ньому виникає суттєве падіння напруги. Ця напруга також прикладається й до паралельно приєднаного терморезистора, що може призвести до його розігріву та переходу у високопровідний стан. Таким чином, у такий спосіб виникає шунтування неактивного фотоелектричного елемента, аналогічне спрацьовуванню байпасного діода.

Крім того, за конструктивної реалізації доповнення окремого ФЕ байпасним терморезистором, який перебуває з ним у тепловому контакті, ефект шунтування може статися і за значень напруги, менших за напругу, яка забезпечує ФПМІ окремого терморезистора, оскільки останній додатково може розігріватися завдяки теплу, яке виділяє фотоелемент.

Такі терморезистори з ФПМІ широко використовуються в реалізації пристроїв автоматичного контролю, перемикачів і обмежувачів потужності, термоелектричних перетворювачів електричних і оптичних сигналів тощо [22].

Однак відомості про їхнє використання в сонячних батареях у літературі не наводяться. У зв'язку з цим актуальним є експериментальне обґрунтування можливостей і перспектив використання критичних терморезисторів на основі діоксиду ванадію для запобігання перегрівання у колах фотоелектричних систем сонячних батарей.

Перелік використаних літературних джерел до вступу

1. Köntges, M., Kurtz, S., Packard, C. E., Jahn, U., Berger, K. A., Kato, K., ... & Friesen, G. (2014). Review of failures of photovoltaic modules.

<http://repository.supsi.ch/id/eprint/9645>

2. Aghaei, M., Fairbrother, A., Gok, A., Ahmad, S., Kazim, S., Lobato, K., ... & Kettle, J. (2022). Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *159*, 112160.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112160>

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

<https://doi.org/10.3390/en15124303>

4. Akram, M. W., Li, G., Jin, Y., & Chen, X. (2022). Failures of Photovoltaic modules and their Detection: A Review. *Applied Energy*, *313*, 118822.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118822>

5. Tonkoshkur, A., Ivanchenko, A., Nakashydzhe, L., Lyashkov, A., & Gomilko, I. (2021). Application of polymer posistor nanocomposites in systems for protecting photovoltaic components of solar arrays from electrical overloads. International Science Group.

<https://doi:10.46299/978-1-63972-054-5>

6. Tang, S., Xing, Y., Chen, L., Song, X., & Yao, F. (2021). Review and a novel strategy for mitigating hot spot of PV panels. *Solar Energy*, *214*, 51–61.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.047>

7. Winston, D. P., Karthikeyan, G., Pravin, M., JebaSingh, O., Akash, A. G., Nithish, S., & Kabilan, S. (2021). Parallel power extraction technique for maximizing the output of solar PV array. *Solar Energy*, *213*, 102-117.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.088> Get rights and content

8. Krishna, G. S., & Moger, T. (2019). Reconfiguration strategies for reducing partial shading effects in photovoltaic arrays: State of the art. *Solar Energy*, *182*, 429-452.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.057>

9. Bauwens, P., & Doutreloigne, J. (2014). Reducing partial shading power loss with an integrated smart bypass. *Solar Energy*, *103*, 134-142.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.040>

10. Kim, K. A., & Krein, P. T. (2015). Reexamination of photovoltaic hot spotting to show inadequacy of the bypass diode. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5(5), 1435–1441.
<https://DOI: 10.1109/JPHOTOV.2015.2444091>
11. Dhimish, M., Holmes, V., Mather, P., & Sibley, M. (2018). Novel hot spot mitigation technique to enhance photovoltaic solar panels output power performance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 179, 72–79.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.02.019>
12. 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: 10.1109/JPHOTOV.2013.2282736>
13. Guerriero, P., & Daliento, S. (2019, September). A Power MOS Based Circuit for Controlling the Hot Spot Temperature in Photovoltaic Modules. In *2019 25th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC)* (pp. 1–5). IEEE.
<https://DOI: 10.1109/THERMINIC.2019.8923447>
14. Guerriero, P., & Daliento, S. (2019). Toward a hot spot free PV module. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9(3), 796–802.
<https://DOI: 10.1109/JPHOTOV.2019.2894912>
15. Golubovic, B., Becker, P. N., & Moore, R. P. (2010). *U.S. Patent No. 7,660,096*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
<https://patents.google.com/patent/US7660096B2/en>
16. Tonkoshkur, A. S., & Ivanchenko, A. V. (2019). Electrical properties of structures based on varistor ceramics and polymer nanocomposites with carbon filler. *Journal of Advanced Dielectrics*, 9(03), 1950023.
<https://DOI.ORG/10.1142/S2010135X19500231>
17. Ivanchenko, A. V., Tonkoshkur, A. S., & Mazurik, S. V. (2019). Application of varistor-positistor structure for protection from overvoltages of photovoltaic cells of solar arrays. *Journal of physics and electronics*, (27 (1)), 79–88.
<https://doi: 10.15421/331913>

18. Ghanbari, T. (2017). Hot spot detection and prevention using a simple method in photovoltaic panels. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 11(4), 883–890.
<https://DOI.ORG/10.1049/iet-gtd.2016.0794>
19. Dhimish, M., & Chen, Z. (2019). Novel open-circuit photovoltaic bypass diode fault detection algorithm. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9(6), 1819–1827.
<https://DOI.ORG/10.1109/JPHOTOV.2019.2940892>
20. Lee, C. G., Shin, W. G., Lim, J. R., Kang, G. H., Ju, Y. C., Hwang, H. M., ... & Ko, S. W. (2021). Analysis of electrical and thermal characteristics of PV array under mismatching conditions caused by partial shading and short circuit failure of bypass diodes. *Energy*, 218, 119480.
<https://DOI.ORG/10.1016/j.energy.2020.119480>
21. Tonkoshkur, O. S., & Ivanchenko, O. V. (2021). 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*, (3-4), 57–64.
<http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.3-4.57>
22. Ke, Y., Wang, S., Liu, G., Li, M., White, T. J., & Long, Y. (2018). Vanadium dioxide: The multistimuli responsive material and its applications. *Small*, 14(39), 1802025.
<https://doi.org/10.1002/sml.201802025>

Розділ 1

СУЧАСНІ ЗАСОБИ ЗАХИСТУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ КОМПОНЕНТІВ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ ВІД ЕЛЕКТРОТЕПЛОВИХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ

1.1. Оптимальне реконструювання топології фотоелектричних систем

1.1.1. Основні типи топології масиву фотоелектричних модулів

Продуктивність фотоелектричних систем сонячних батарей залежить від таких параметрів, як опромінення, старіння, деградація елементів, робоча температура, часткове затінення (наявність «гарячих плям») тощо [1]. Серед усіх цих параметрів, опромінення та температура є основними факторами, які впливають на продуктивність фотоелектричних модулів. Однією з найімовірніших причин такого впливу є виникнення, так званого, ефекту з'єднань, який визначається неузгодженістю (невідповідністю) електричних кіл в одному модулі, що викликано використанням фотоелектричних елементів з різними властивостями або функціонуванням у різних умовах.

Вихідна потужність сонячної батареї знижується через втрати від неузгодженості, які є різницею між вихідною потужністю рядків фотоелектричних модулів через умови часткового затінення [2]. Для зменшення цих втрат напівпровідникові пристрої або ідеальні перемикачі, або діоди, або комбінація вищезгаданих трьох пристроїв використовуються в певних існуючих топологіях.

Для формування фотоелектричних масивів найчастіше використовуються такі типи топологій фотоелектричної матриці, як послідовна (*Se*), паралельна (*Pa*) і послідовно-паралельна (*Se-Pa*). У *Se*-топології всі фотоелектричні модулі з'єднані послідовно одна з одною. При такому з'єднанні вихідний струм кожної сонячної батареї однаковий, а напруга масиву дорівнює сумі напруг усіх фотоелектричних модулів [3]. При паралельному

з'єднанні, тобто *Pa*-топології, всі сонячні батареї з'єднані паралельно одна до одної. При цьому напруга фотоелектричного масиву дорівнює напрузі однієї сонячної батареї, а вихідний струм – сумі струмів кожної батареї. Тоді як в топології *Se-Pa* частина сонячних батарей з'єднана послідовно, а частина – паралельно у вигляді матриці, щоб забезпечити необхідну напругу та струм. Порівняно з топологіями *Se* та *Pa*, *Se-Pa* є найбільш поширеною топологією фотоелектричної матриці. Така топологія надійна, практична і має зменшену кількість надлишкових з'єднань [4].

Однак, хоча топологія *Se-Pa* використовується в даний час у польових умовах, продуктивність фотоелектричного масиву значно знижується під час часткового затінення. Під час таких затіньок виникають численні піки на вольт-амперних характеристиках фотоелектричних модулів. Отже, контролер відстеження точки максимальної потужності (*MPPT*) не може відстежувати глобально таку точку. Крім того, активація шунтуючого діода частково затінених сонячних батарей призводить до втрат, що пов'язані з неузгодженістю.

Через вищезазначені причини в літературі були запропоновані такі топології фотоелектричних матриць:

- *TCT* (Total Cross-Tied) – тотальні перехресні зв'язки;
- *BC* (Bridge Coupled) – спарений міст;
- *HC* (Honey Comb) – топологія «медовий стільник»;
- *SuDoKu* – топологія «Судоку».

Топологія *TCT* усуває недоліки *Se-Pa* топології [5]. У цій топології напруга на кожному рядку дорівнює напрузі окремої сонячної батареї, а напруга масиву дорівнює сумі напруг на всіх рядках.

У фотоелектричних матрицях топології *BC* сусідні рядки з'єднані у вигляді мостової схеми. Топологія *BC* має більшу кількість послідовно з'єднаних рядків, ніж топологія *TCT*.

У матрицях *HC*-топології модулі з'єднані у формі шестикутника. Втрати, при неузгодженості, для неї більші, ніж у топологіях *TCT* і *BC*, але менші, ніж у топологіях *Se* і

Se-Pa.

У топології *SuDoKi* змінюється лише розташування модулів без зміни електричного з'єднання між ними. Таке фізичне переміщення модулів допомагає розсіювати ефект часткового затінення при вирішенні головоломки. Ця топологія долає два основні недоліки всіх попередніх конфігурацій, а саме: втрати на лініях і затінення підмасивів. Зменшення лінійних втрат вимагає мінімальної кількості дротів. Додаткова довжина дротів, необхідна для кожної сонячної батареї, залежить від її взаємного розташування відносно попередньої та наступної сонячної батареї, присутніх у конкретній колонці. Таким чином, сонячні батареї розташовуються послідовно, використовуючи рішення головоломки, отже, додаткові вимоги до проводки зводяться до мінімуму [6].

Важливе значення надається дослідженням ефективності різних топологій фотоелектричної матриці в залежності від типу (форми) умов часткового затінення [7]. Детальне порівняння послідовної (*Se*) та послідовно-паралельної (*Se-Pa*) топології матриць фотоелектричних елементів під дією часткового затінення пояснюється в роботі [8]. Наведені топології масивів підкреслюють, що масштаб точки максимальної потужності *MPP* (maximum power point) залежить виключно від топології фотоелектричної матриці і відповідного шаблону затінення. У роботах [9, 10, 11] проаналізовано продуктивність різних топологій, та надано технічну та економічну оцінку використання систем реконфігурації.

On-line-реконфігурація для всіх типів фотоелектричних систем обговорюється в роботах [12 – 15]. Ця технологія є дуже складною при впровадженні, а також вимагає дуже високих витрат. Різні методи відстеження *MPP*, що використовуються в підвищуючих напругу *DC-DC* перетворювачах для отримання максимальної потужності з різними типами топологій фотоелектричних матриць за нормальних умов, а також для різних варіантів часткового затінення, описані в роботі [16]. Нові методики для отримання більшої потужності з фотоелектричного масиву в

умовах часткового затінення описані в [17, 18, 19].

1.1.2. Підвищення ефективності фотоелектричних систем за рахунок їх топології

Часткове затінення в фотоелектричному масиві впливає не тільки на генерування електроенергії затіненого фотоелектричного модуля, але й на інші, які не затінені [20–24].

Для розуміння впливу часткового затінення на фотоелектричну матрицю *TCT*-топології розміром 2×2 можна надати наступні пояснення. *TCT*-топологія фотоелектричної матриці з частковим затіненням на панелі *P22* показана на рис. 1.1а.

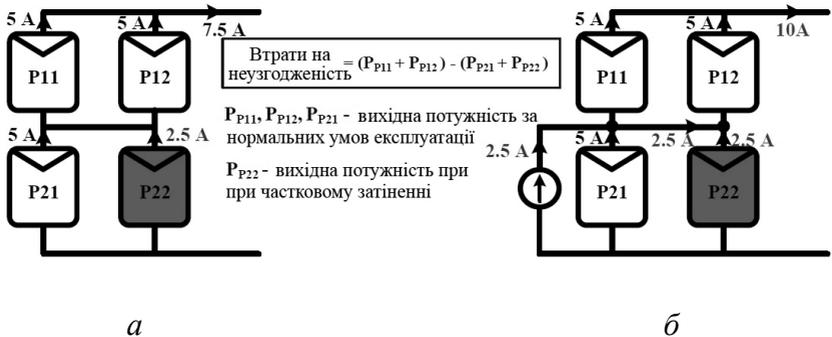


Рисунок 1.1 Традиційний фотоелектричний масив 2×2 *TCT*-топології (а) та використання методу інжекції струму щодо цього масиву (б)

Кожна сонячна батарея має максимальну напругу $V_m=20$ В і максимальний струм $I_m=5$ А при стандартних тестових умовах. Сонячна батарея *P22* частково затінена (на 50%), а інші сонячні батареї отримують повне опромінення. Через часткове затінення сонячна батарея *P22* генерує 2,5 А, тоді як інші батареї генерують струм 5 А. Однак вихідний струм такої фотоелектричної системи становить 7,5 А. Таким чином, фактична потужність фотоелектричного

масиву становить 300 Вт, тобто $40 \text{ В} \times 7,5 \text{ А}$. Отже, втрати на неузгодженість складають 50 Вт.

Щоб зменшити ці втрати при неузгодженості, в [19] пропонується новий метод для топології *TCT*, як показано на рис. 1.1 б. Джерело струму підключається до частково затіненої сонячної батареї, щоб інжектувати струм, еквівалентний втратам на неузгодженість. У цьому випадку струм 2,5 А подається в рядок 2, як показано на рис. 1.1. б.

Таким чином, вихідний струм масиву стає 10 А при напрузі масиву 40 В, а результуюча вихідна потужність масиву становить 400 Вт. Хоча 50 Вт інжектуються джерелом струму, додаткові 50 Вт генеруються фотоелектричним масивом під час фотоелектричної активності.

В існуючій топології *TCT* струм неузгодженості зростає при збільшенні часткового затінення. Цей струм призводить до більших втрат на неузгодженість у цій топології. Для подолання вищезазначеної проблеми пропонується новий метод шляхом модифікації існуючої топології $M \times N$ *TCT*, як показано на рис. 1.2 б [19]. У такому запропонованому варіанті джерело струму підключається через кожен рядок ланцюга топології *TCT*. Під час часткового затінення струм, що інжектуються кожним джерелом струму, дорівнює струму неузгодженості відповідного рядку. Таким чином, ефект часткового затінення зводиться нанівець шляхом інжекції струму неузгодженості через сонячну батарею, яка частково затінена. Загальна ефективність *TCT* топології фотоелектричної матриці збільшується.

Запропонований в [19] підхід збільшує вихідну потужність на 105 %, тобто, 961 Вт потужності отримується від сонячних батарей для затінення типу *SW* (коротке та широке). Тоді, як у випадку затінення *RAN* (випадкове), запропонований підхід збільшує вихідну потужність на 68,4 %.

Слід також відмітити, що за різних типів затінення, зокрема, при затіненнях *LN* (довге і вузьке) та *LW* (довге і широке) вихідна потужність збільшується на 52,5% і 53,6% відповідно.

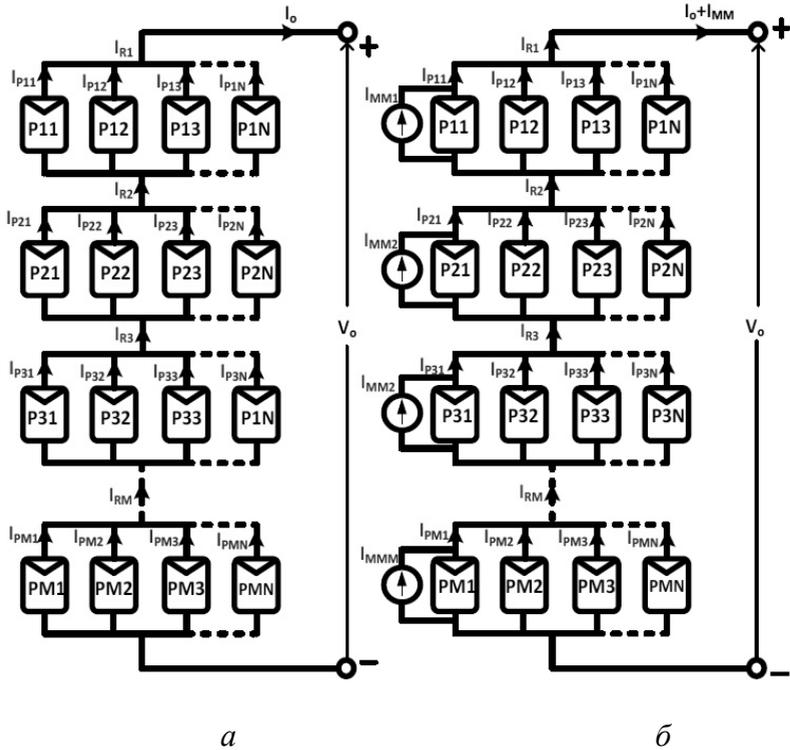


Рисунок 1.2 – Існуюча (а) та запропонована [19] (б) $M \times N$ топологія фотоелектричної матриці типу TCT

В інших випадках, таких як затінення SN (коротке і вузьке), UR (нерівномірний рядок) і DIA (діагональне), вихідна потужність збільшується на 47 %, 21,8 % і 17,8 % відповідно. У випадку затінення UC (нерівномірний стовпчик) досягається лише 5 % збільшення вихідної потужності.

1.2. Методи з використанням додаткових спеціальних пристроїв

1.2.1. Загальні засоби захисту від електричних перевантажень сонячних електростанцій

Сонячна електростанція є системою з фотоелектричних модулів, кабелів, запобіжників, обмежувачів перенапруження і перетворювачів енергії [25]. На рис. 1.3 показана спрощена схема електростанції. Сонячні батареї використовують енергію сонячного світла, перетворюючи фотони у фотоелектричний струм. Електрична енергія, генерована сонячними батареями, надходить до перетворювача струму, де інвертується з постійного струму в змінний.

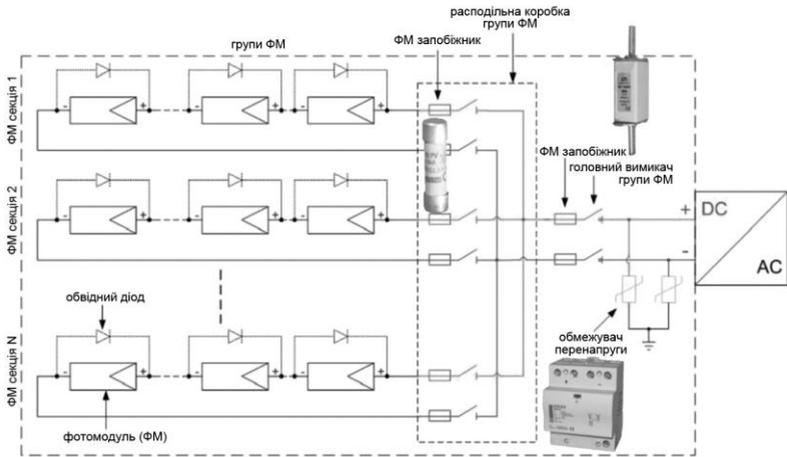


Рисунок 1.3 – Спрощена схема сонячної електростанції

Плавкі запобіжники захищають фотоелектричні модулі (або сонячні батареї) від струмів перевантаження (рис. 1.3). Якщо фотоелектрична система складається з трьох або більшої кількості секцій, які сполучені паралельно, то кожен з них необхідно захищати запобіжниками окремо. Якщо в системі менше трьох секцій, то аварійний струм, що генерується, не зможе пошкодити провідники та сонячну

батарею.

Зазвичай до кожної секції підключають два запобіжника (на "+" та "-" полюсі), які захищають провідники та сонячні батареї від пошкоджень і підвищують безпечність їх функціонування. Запобіжники ізолюють аварійні секції. Остання частина фотоелектричної системи може продовжувати генерувати електроенергію.

Обмежувачі перенапруження (серії *ETITEC B, C-PV*) були розроблені для захисту від прямого та непрямого ударів блискавки й призначені для захисту систем сонячних батарей взагалі. Коло складається з двох груп варисторів, кожна з яких захищена термічним вимикаючим пристроєм.

1.2.1.1. Байпасні діоди та принцип їх дії

Руйнівну дію локального перегріву можна нівелювати за допомогою байпасного діода [26]. Байпасний діод з'єднується паралельно з фотоелектричним елементом так, щоб їх полярності були протилежні.

В умовах короткого замикання і розімкнутого кола при узгоджених струмах кожен фотоелектричний елемент з послідовного з'єднання буде зміщений у прямому напрямку, а байпасний діод – у зворотному напрямку.

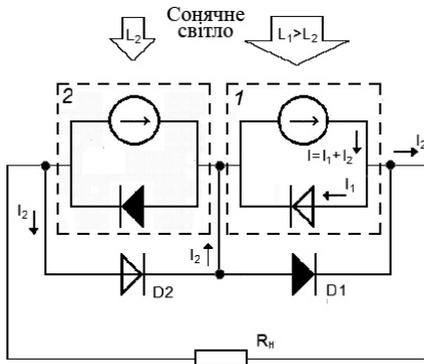
Однак, коли «поганий» фотоелектричний елемент у результаті невідповідності струмів короткого замикання між декількома послідовно з'єднаними елементами зміститься у зворотному напрямку, байпасний діод стане провідним, дозволяючи струму від «хороших» елементів «текти» в зовнішньому колі, не змінюючи напругу на кожному «хорошому» елементі.

Робота байпасних діодів при короткому замиканні ($R=0$) з неузгодженими струмами показані на рис. 1.4.

Фотострум від «хорошого» фотоелектричного елемента I зміщує його в прямому напрямку. Його байпасний діод $D1$ зворотно зміщений і не дає жодного ефекту.

Байпасний діод затіненого фотоелектричного елемента $D2$ зміщений у прямому напрямку струмом від «хорошого» фотоелектричного елемента та проводить цей

струм. Сам затінений фотоелектричний елемент має зворотне зміщення.



$D1$ і $D2$ – байпасні діоди;

L_1 і L_2 – інтенсивності освітлення фотоелектричних елементів;

I , I_1 та I_2 – струм фотогенерації освітленого фотоелектричного елемента 1, його внутрішня та зовнішня (через опір навантаження R_H) складові.

Рисунок 1.4 – Принцип дії байпасних діодів в послідовно з'єднаних фотоелектричних елементах у разі неузгоджених струмів при короткому замиканні

В умовах розімкненого кола з неузгодженими струмами затінений фотоелектричний елемент має зменшену напругу холостого ходу V_{oc} . Обхідні діоди назад зміщені й не дають жодного ефекту.

У зв'язку з тим, що на практиці використовувати байпасний діод для кожного фотоелектричного елемента занадто дорого, їх підключають одразу до декількох послідовно з'єднаних фотоелементів (підпанелі) або до всього фотоелектричного модуля (панелі). Напруга на затіненому елементі або будь-якому іншому елементі, що створює низький струм, дорівнює напрузі прямого зміщення на всіх інших послідовно включених фотоелектричних елементах плюс напруга на байпасному діоді.

1.2.1.2. Особливості формування «гарячих плям» в сонячних модулях з байпасними діодами

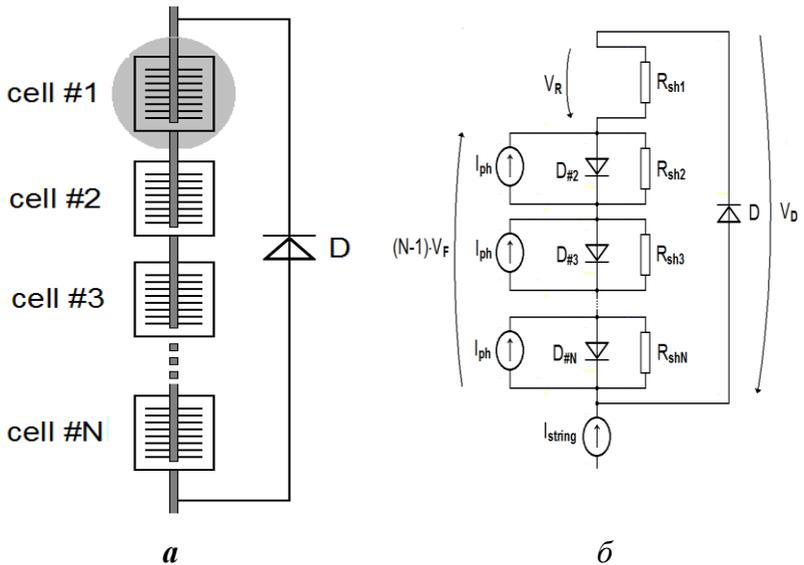
Як відомо, фотоелектричні модулі сонячних батарей складаються з послідовно пов'язаних фотоелектричних елементів. Зазвичай, вони організовані в підмодулі по 20 штук. Кожний підмодуль обладнаний байпасним діодом [27]. Якщо один або кілька фотоелектричних елементів затінені або несправні, вони зменшують генерований фотострум і, таким чином, переходять в режим зворотного зміщення, а байпасний діод гарантує альтернативний шлях струму, тим самим забезпечуючи роботу інших підмодулів [28] (рис. 1.5).

Якщо струм, генерований фотоелектричним елементом «*cell #1*», менший за інший (на рис. 1.5 він прийнятий рівним нулю), надлишковий струм, що надходить з інших підмодулів I_{string} змушений проходити через байпасний діод D (у першому наближенні складова струму через R_{sh1} може не враховуватись, тобто можна прийнято $R_{sh1} = \infty$). Як наслідок, напруга на всьому підмодулі збігається з падінням напруги V_D на прямозміщеному байпасному діоді D .

Решта фотоелектричних елементів («*cell #i*», де $i = 2, 3, \dots, N$) усередині підпанелі не можуть віддати свої згенеровані фотоструми у зовнішнє електричне коло, тому що їх послідовне з'єднання роз'єдане осередком «*cell #1*». Ці струми змушені проходити через відповідні внутрішні прямозміщені діоди $D_{\#i}$, утворюючи на кожному з них падіння напруги V_F .

У результаті падіння напруги на послідовному з'єднанні освітлених фотоелектричних елементів дорівнює $(N-1) V_F$. Із закону Кірхгофа випливає, що зворотна напруга на затіненому фотоелектричному елементі («*cell #1*») визначається як $V_R = (N-1) V_F + V_D$.

Для надійної конструкції число N повинно бути вибрано досить невеликим, щоб запобігти перевищення V_R над напругою пробою зворотно-зміщеного р-п-переходу затіненого фотоелектричного елемента.



Фотоелектричний елемент «cell #1» приймається повністю затіненим.

D – байпасний діод;

$D_{\#2} \dots D_{\#N}$ – прямозміщені p - n -переходи освітлених ФЕ;

V_F , V_R і V_D – падіння напруги на прямозміщеному p - n -переході освітленого фотоелемента, зворотно-зміщеному p - n -переході затіненого фотоелемента («cell #1») і прямозміщеному байпасному діодові D ;

I_{ph} і R_{sh} – генерований фотострум і шунтуючі опори фотоелектричних елементів;

I_{string} – надлишковий струм, що надходить з інших підмодулів.

Рисунок 1.5 Спрощені уявлення (а) та еквівалентна схема (б) окремого підмодуля

Якщо це не зроблено, фотоелектричний елемент буде нагріватися через результуючі потужності розсіювання. Високі температури у локальних областях фотоелектричних елементів можуть призвести до появи «гарячих плям». Так, при збільшенні температури фотоелектричного елемента може виникнути тепловий пробій p - n -переходу, коли

величина зворотної напруги зменшується в міру збільшення струму та виникає її локальний тепловий дрейф у часі. При цьому формуються одномірні канали струму, що може привести до внутрішніх температур у фотоелектричних елементах, що значно перевищують 400°C [29]. «Гарячі плями» за наявності теплового пробою, або без нього, можуть призвести до деградації та руйнації фотоелектричних елементів та модулів.

1.2.2 Схемотехнічні методи запобігання появи «гарячих плям»

На сьогодні основними напрямками розробки методів і засобів запобігання появи «гарячих плям» у фотоелектричних елементах та модулях є такі:

- удосконалення відомих схемотехнічних технологій на основі байпасних діодів, які включають в себе активні обвідні перемикачі;

- використання фотоелектричних елементів, які мають характеристики зворотного пробою з малою амплітудою напруги або захистом від розімкнутого контуру;

- застосування виявлення й активного захисту, які базуються на технологіях відстеження точки максимальної потужності компонентів сонячних батарей.

Нижче наведено короткі відомості про основні результати в зазначених та інших запропонованих напрямках досягнутих останнім часом.

1.2.2.1. Активні обвідні перемикачі

Байпасні діоди допомагають обмежити максимальну потужність, яка може розсіюватись, незважаючи на зворотно-зміщений фотоелектричний елемент, але цей рівень потужності залежить від кількості таких елементів у рядка підмодуля. Серія рядків з великою кількістю фотоелектричних елементів буде розсіювати більше тепла, ніж рядки з меншою їх кількістю [30].

Таким чином, байпасні діоди більш ефективні в пом'якшенні «гарячих плям» для рядків фотоелектричних елементів, які є короткими. Наприклад, розміщення

байпасних діодів над кожними двома елементами гарантує, що окремий фотоелектричний елемент ніколи не розсіює більше, ніж номінальна потужність двох таких елементів. Це рівень потужності, який навряд чи зашкодить окремому фотоелектричному елементу.

Раніше пропонувалися концепції додавання байпасних діодів у кожній комірці фотоелектричних елементів і безпосереднього збудування байпасного діода в елемент. Однак, додавання дискретних або вбудованих байпасних діодів на рівні окремих фотоелектричних елементів істотно збільшує вартість системи. Для наземної фотоелектричної промисловості ця додаткова вартість є надто великою, так що окремі байпасні діоди, як правило, не були реалізовані та навряд чи будуть прийняті у найближчому майбутньому. Таким чином, необхідні інші недорогі та практичні методи запобігання «гарячим плямам» [29].

У роботах [31, 32] запропоновані активні комутаційні рішення, які також скорочують підмодуль (підпанель) фотоелектричних елементів при його обході. Метод активного байпасного перемикача зменшує напругу та втрати потужності в лінії фотоелектричних елементів у ситуації струмового обводу й цим самим зменшує ймовірність появи «гарячих плям».

На рис. 1.6 зображений варіант такої активної системи обводу запропонований у [32].

Схема включає в себе:

- біполярний транзистор M_{bip} , який діє як обхідний компонент, пропонуючи альтернативний шлях для струму I_{bypass} , коли підмодуль частково затінений;

- два n-канальних МОН-транзистори, позначені M_A та M_B , які призначені для автоматичного включення біполярного транзистора M_{bip} у разі затінення, а також для його неактивності, коли підмодуль піддається впливу сонячного світла;

- додатковий діод, щоб частково підтримувати біполярний транзистор або повністю витримувати обвідний струм, якщо підмодуль зламаний або підданий впливу

ідеально темних умов (струм $I_{shadow} = 0$).

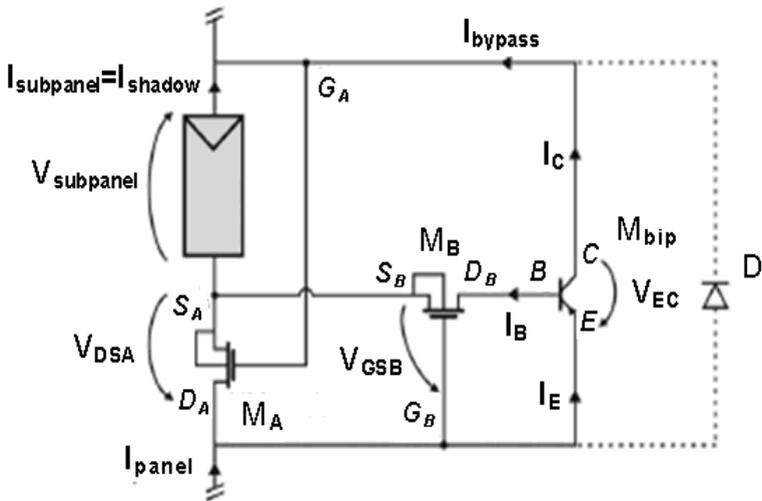


Рисунок 1.6 Схема активного байпасного перемикача на основі транзисторів

Якщо підмодуль освітлюється, то висока (позитивна) напруга $V_{subpanel}$ приводить польовий транзистор M_A у лінійний режим (збагачений носіями заряду канал). Отже, напруга між його стоком і витком V_{DSA} набагато нижча ніж порогова напруга V_{THV} транзистора M_B . Останній знаходиться у режимі відсічення (збіднений канал) і практично відключає струм бази I_B біполярного транзистора M_{bip} , забезпечуючи його закритий стан. При частковому затіненні підпанелі зменшується напруга $V_{subpanel}$. У транзистора M_A частково перекривається канал, а напруга V_{DSA} (рівна V_{GSB}) збільшується.

При $V_{DSA} > V_{THV}$ транзистор M_B переходить в лінійний режим (відкриває канал) і забезпечує протікання базового струму $I_B = I_{DB}$ біполярного транзистора M_{bip} , який переходить в насичення (коли падіння напруги між емітером і колектором V_{EC} - низьке), утворюючи обвідний канал для струму I_{bypass} . При цьому підпанель продовжує створювати

електричну енергію, яка розсіюється польовим транзистором M_A , внаслідок чого зменшується ймовірність локальних пошкоджень через появу «гарячих плям» і лавинного руйнування фотоелектричних елементів усередині підпанелі.

При більш повному затіненні підмодуля він виступає як навантаження (або його частина) відносно інших незатінених підмодулів (з'єднаних послідовно у відповідному модулі) і напруга, прикладена до нього, зворотна відносно напруги $V_{subpanel}$ при освітленні. У результаті $I_{shadow} = 0$, обидва польових транзистора закриваються (якщо $I_{shadow} = 0$, то і $I_{DA} = I_{DB} = 0$) і працює додатковий байпасний діод D , який буде повністю проводити струм фотоелектричних елементів I_{panel} , що належать іншим підмодулям.

1.2.2.2. Методи виявлення та активного захисту

Можна виділити два напрямки в розробці захисту від «гарячих плям» на рівні окремого фотоелектричного модуля (сонячної батареї), які базуються на застосуванні методів відстеження точки максимальної потужності *MPPT* (Maximum Power Point Tracking).

Перший з них зводить завдання захисту до оптимізації режимів роботи окремих частин сонячних батарей. Як приклад такого підходу можна вказати наведені в [33] результати симуляції й польових випробувань поведінки «гарячих плям» у фотоелектричних системах із центральним і розподіленим *MPPT*. Останній з них визнаний більш ефективним, тому що дозволяв уникати «гарячих плям» в умовах затінення більше однієї поверхні комірки, чим при використанні центрального *MPPT*.

Інший напрямок ставить завдання запобігання виникненню «гарячих плям» шляхом моніторингу послідовного з'єднання сонячних батарей під час роботи. Це повинно дозволити вчасно визначити та активно захистити їх рядок при виявленні стану «гарячої плями» [29].

Для виявлення «гарячих плям» була запропонована концепція на основі використання змін параметрів імпедансу [34] або параметрів вольт-амперної характеристики [35]

рядка фотоелектричних елементів при частковому затіненні окремих модулів. Алгоритми виявлення «гарячої плями» можуть працювати в тандемі з контролем *MPPT*, періодично перериваючи *MPPT* для вимірювання імпедансу або інших електричних параметрів рядка фотоелектричних модулів (панелей).

Коли виявлений підрядок, який містить неузгоджений осередок (наприклад, окремий фотоелектричний модуль), гарантованим методом запобігання «гарячої плями» є його відключення, тому що в цьому випадку струм через його комірки не проходить. У зв'язку з цим перспективною є концепція захисту рядків панелей фотоелектричних елементів від «гарячих плям» шляхом їх відключення [29].

Блок-схема одного з варіантів реалізації такого захисту, де є система діагностики та моніторингу окремого сонячного модуля й засоби, що дозволяють виключати його з рядка, якщо вона є неузгодженою (наприклад, затіненою) [36, 37], представлена на рис. 1.7 та 1.8.

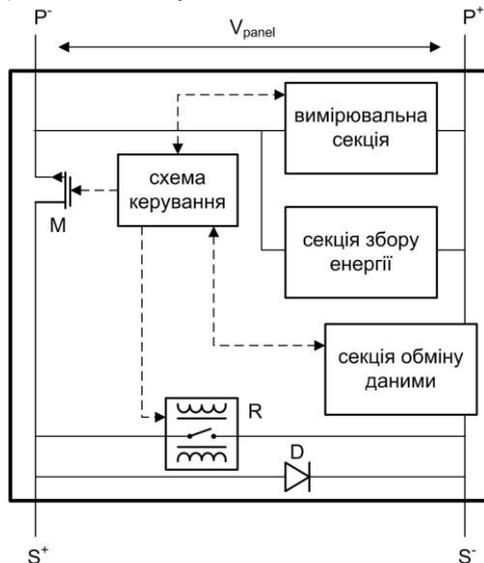


Рисунок 1.7 Схема включення пристроїв захисту фотоелектричних модулів (сонячних панелей) в їх рядку

Як видно, даний пристрій захисту окремого

фотоелектричного модуля (позначений на рис. 1.8 як *SMSC*) складається з таких секцій: вимірювальної (measurementsection), енергозабезпечення (energy harvestingsection) та обміну даними (date exchangection). Пристрій також містить байпасний діод *D*, що відключає панель, польовий транзистор *M*, біполярне електромеханічне реле для закорочування зовнішніх виводів сонячної батареї у нештатних ситуаціях і контролюючу схему керування (control circuit), що використовує мікроконтролер для забезпечення загальної синхронізації і включення.

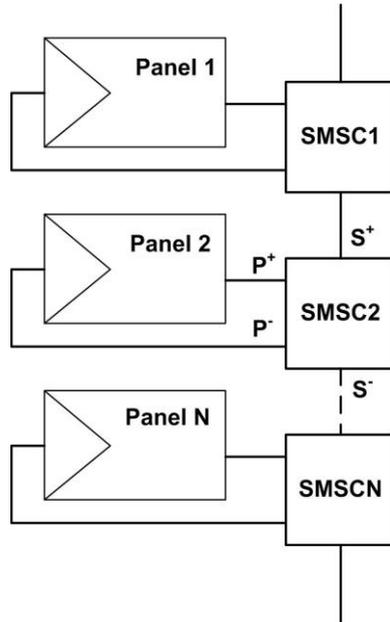


Рисунок 1.8 Блок схема включення пристроїв захисту фотоелектричних модулів (сонячних батарей) в їх рядку

Клеми сонячної батареї P^+ та P^- фізично відокремлені від вихідних клем (S^+ та S^-), які використовуються для послідовного підключення сонячних модулів один до одного.

Коли польовий транзистор *M* знаходиться у вимкненому стані, він працює як розімкнене електричне коло, тобто «відключає» виводи P^- від виводів S^+ . При цьому

пристрій знаходиться в активному стані, тому що його секція енергозабезпечення безпосередньо підключена до «внутрішніх» клем P^+ і P^- . Це дозволяє завжди забезпечувати позитивну напругу, яка дорівнює напрузі незамкненого кола V_{oc} відключеної сонячної батареї.

В іншому випадку V_{panel} дорівнює робочій напрузі панелі. І, як наслідок, схема завжди керована, панель сонячних батарей може бути, в кінцевому підсумку, підключена відкриттям реле і може керуватися транзистором M у ввімкненому стані.

Байпасний діод D допускає безперервний струм рядка з сонячних батарей, незалежно від стану транзистора M , тобто безперервна потужність, що подається з рядка, гарантується, навіть коли окрема її сонячна батарея відключена.

Коли транзистор M вимкнений, вимірювальна секція працює на ізольованій окремій сонячній батареї. Виміряні величини (напруга розімкнутого контуру та струм короткого замикання) не залежать від робочої точки інших сонячних батарей рядка та можуть, таким чином, використовуватися для індивідуальної характеристики стану окремої панелі. Коли транзистор M включений, реєструється фактичне генерування електроенергії (відповідно до контрольної точки).

Секція обміну даними під час нормальної роботи контролює їх трафік для цілей конфігурації або діагностики. У разі позаштатної ситуації вона розпізнає конкретне кодифіковане слово та запускає процедуру забезпечення безпеки, що означає закриття реле R .

Передача даних може бути реалізована на тих же принципах, що і відомі схеми для цілей моніторингу [35, 38], де виміряні дані (робочі напруги та струми) передавалися в центральний блок за допомогою бездротових протоколів [37] або на основі ліній електропередачі PLC [35, 38]. У даному варіанті використана спеціальна комунікаційна PLC схема, яка використовує шину постійного струму з'єднання сонячних панелей. Проблеми усунення спотворень сигналів даних, що виникають при їх переміщенні по сонячних

батареях, вирішуються шляхом використання обхідних високочастотних фільтрів, паралельно підключених до кожної сонячної панелі [37, 39].

1.2.2.3. Використання фотоелектричних елементів з низьким опором зворотного пробою

Одним з напрямків розв'язання задачі запобігання появи «гарячих плям» є використання фотоелектричних елементів з низьким опором зворотного пробою. Такі фотоелектричні елементи виявляють максимальну потужність розсіювання при повному затіненні. Відомо, що потужність розсіювання пропорційна напрузі пробою. Таким чином, зниження величини напруги пробою також знижує максимально можливу потужність, що розсіюється в осередку фотоелектричного елемента. Проте фотоелектричні елементи з низькими характеристиками зворотного пробою також стають зворотно-зміщеними та розсіюють тепло. Цей підхід ефективний тільки в тому випадку, коли осередок фотоелектричного елемента розсіює тепло, не викликаючи пошкоджень.

Попередні дослідження [29] свідчать про те, що втрати розсіювання більші ніж в три рази, порівняно з точкою максимальної потужності (*MPP*) фотоелектричного елемента, тобто, потенційно він може стати пошкодженим. Таким чином, необхідні подальші дослідження у цьому напрямку на фотоелектричних елементах з малими величинами напруги пробою, щоб визначити їх сприйнятливість до «гарячих точок».

1.2.2.4. Функціональні характеристики твердотільних двокомпонентних варисторно-позисторних самовідновлюваних обмежувачів напруги та їх особливості

Неоднорідні діелектрики широко застосовують при створенні сучасних елементів функціональної електроніки, таких як варистори, *PPTC* запобіжники, напівпровідникові газочутливі датчики та ін. [40 – 42].

Низку унікальних електричних властивостей мають

гібридні структури на основі зазначених діелектриків. До таких структур належить комбінована двошарова система, одним шаром якої є варисторна кераміка, а другим – наноккомпозит, що використовується в *PPTC fuse* технології «*Polyswitch*», які знаходяться в тепловому контакті [43, 44]. Еквівалентна схема такої комбінованої структури зображена на рис. 1.9 а.

Під час прикладання вхідної перенапруги до такої структури струм, що протікає через варисторний шар, нагріває його, а тепло, що розсіюється цим варисторним шаром, нагріває послідовно ввімкнений шар позистора й обумовлює збільшення його опору. У результаті має місце перерозподіл вхідної перенапруги між шарами, що, у підсумку, забезпечує обмеження на заданому рівні вихідної напруги варисторного шару та, звісно, на ввімкненому паралельно до нього навантаженні (рис. 1.9 б). Таким чином, даний пристрій може забезпечити захист електричних кіл від постійної перенапруги, що є однією з основних проблем [29, 45, 46] під час розв'язання завдань підвищення надійності фотоелектричних систем сонячної енергетики.

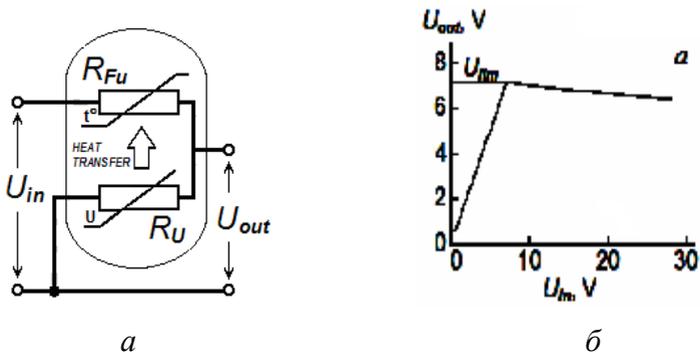
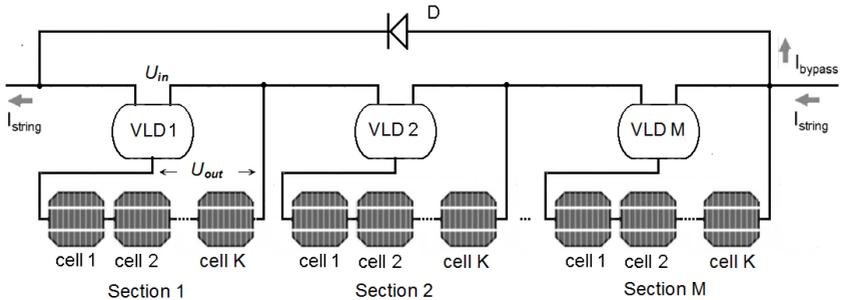


Рисунок 1.9 Еквівалентна електрична схема обмежувача постійної напруги (а) та перехідна характеристика $U_{out}=f(U_{in})$ (б) обмежувача напруги на основі варисторно-позисторної пари

Одним із найвідоміших способів захисту від високої напруги елемента електричного кола є встановлення

паралельно до нього обмежувача напруги (ОН) [40, 47]. Такий підхід дає змогу запропонувати електричну схему для захисту одного або послідовно з'єднаних фотоелектричних елементів від перенапруг у фотоелектричному підмодулі, показано на рис. 1.10 [48].



VLD – обмежувач напруги.

Рисунок 1.10 – Схема ввімкнення обмежувача напруги для захисту фотоелектричних елементів

Кожна секція з кількох фотоелектричних елементів під'єднується до вихідного кола окремого обмежувача напруги (ОН). Послідовне з'єднання входних кіл ОН утворюють фотоелектричний підмодуль з паралельно під'єднаним до нього байпасним діодом. Таким чином, між окремими секціями фотоелектричних елементів вмикається самовідновлювальний запобіжник, а паралельно кожній секції фотоелектричних елементів – варистор.

Коли весь підмодуль освітлений і всі його фотоелектричні елементи кондиційні (однакові), вони зміщені в прямому напрямку та мають низький опір. Струм $I_{string} = I_{subpanel}$ протікає через підмодуль, а обхідний діод *D* вимкнений. При цьому виконуються умови, які забезпечують відсутність впливу ОН на функціонування підмодуля в такому (робочому) стані.

Напруга, що генерується окремою секцією фотоелектричних елементів (рис. 1.10) та прикладається до варистора, менша за класифікаційну напругу варистора U_c

(яка, своєю чергою, має бути вибрана меншою за зворотну напругу пробою $p-n$ переходу секції фотоелектричних елементів U_b), і, природно, останній перебуває у стані з високим опором, і, таким чином, не впливає на роботу фотоелектричного модуля.

Гранична величина мінімального початкового опору, має бути у багато разів меншою від послідовного опору прямозміщеного фотоелектричного елемента. Опір $PPTC$ -запобіжника у провідному стані R_{Fu} (визначається паспортними величинами).

Струм спрацьовування I_{trip} , тобто мінімальний струм через $PPTC$ -запобіжник, за якого відбувається перехід від провідного стану до непровідного, має бути більшим за струм короткого замикання окремого фотоелектричного елемента.

За наявності хоча б одного «поганого» фотоелектричного елемента з підвищеним опором струм I_{string} починає протікати через обхідний діод D , який у ввімкненому стані закорочує підмодуль. У результаті реалізується ситуація, коли вся напруга, що генерується освітленими фотоелектричними елементами, зміщуватиме у зворотному напрямку «поганий» (або «погані») фотоелектричний елемент.

Якщо вибрати класифікаційну напругу варистора U_C меншою за сумарну напругу, що генерується освітленими секціями фотоелектричних елементів, розміщеними за межами секції з «поганим» фотоелектричним елементом, то варистор нагріватиметься, передаючи тепло запобіжнику. Зі збільшенням температури такого ОН до T_{trip} запобіжник різко та набагато збільшить свій опір, що еквівалентно розмиканню кола цього підмодуля.

У розглянутому стані підмодуля мають виконуватися такі фізичні обмеження:

- напруга на окремому захищеному від перегріву «поганому» фотоелектричному елементі не повинна перевищувати напругу його пробою;

- напруга, що прикладається до варисторного елемента за відсутності «поганих» фотоелектричних

елементів, має бути робочою, тобто меншою за його класифікаційну напругу.

1.2.3. Перспективи застосування байпасних елементів на основі критичних терморезисторів

До теперішнього часу найпоширенішим технічним вирішенням проблем захисту фотоелектричних компонентів сонячних батарей від виникнення «гарячих плям» залишається включення додаткових елементів – байпасних діодів. Це доцільно, незважаючи на те, що практика встановлення паралельно ланцюжку фотоелектричних елементів таких діодів показала, що «гарячі плями» все ж таки виникають, що призводить до прискореного погіршення характеристик сонячних батарей [26, 32, 49].

Одним із нетрадиційних можливих шляхів вирішення проблем захисту сонячних модулів та їх фотоелектричних елементів є реалізація байпасного протікання струму в фотоелектричних модулях за допомогою терморезисторів на основі матеріалів з фазовим переходом метал – ізолятор (ФПМІ), на що вказувалося в [50 – 52].

Ці твердотільні елементи мають стрибкоподібну зростаючу залежність електричної провідності при досягненні відповідної температури фазового переходу [53, 54].

Конструктивно тепловий захист реалізується шляхом паралельного під'єднання терморезистора до окремого фотоелектричного елемента або групи таких елементів, з'єднаних послідовно. У разі виникнення перенапруги та нагрівання терморезистора, він може «закоротити» пошкоджені (або затінені) фотоелектричні елементи з високим опором унаслідок переходу його з низькопровідного у високопровідний стан. Таким чином забезпечується протікання струму сонячного модуля повз цей (ці) фотоелектричні елементи та протидія його (їх) подальшій деградації.

Слід зазначити, що такі критичні терморезистори, зокрема терморезистори на основі діоксиду ванадію, широко застосовуються у реалізації пристроїв автоматичного

контролю, перемикачів та обмежувачів потужності, термоелектричних перетворювачів електричних та оптичних сигналів [55 – 59].

Однак відомості про їхнє використання або дослідження перспектив такого використання в сонячних батареях у літературі не наводяться. У зв'язку з цим видається актуальним вивчення та аналіз можливостей використання критичних терморезисторів на основі матеріалів з ФПМІ для запобігання перегрівання фотоелектричних систем сонячних батарей, що й було завданням цієї роботи. У ній наводяться результати моделювання функціонування критичних терморезисторів на основі діоксиду ванадію як захисних шунтувальних елементів у фотоелектричних модулях.

Перелік використаних літературних джерел до розділу 1

1. Manganiello, P., Balato, M., & Vitelli, M. (2015). A survey on mismatching and aging of PV modules: The closed loop. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(11), 7276–7286.

[https://DOI: 10.1109/TIE.2015.2418731](https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2418731)

2. Picault, D., Raison, B., Bacha, S., De La Casa, J., & Aguilera, J. (2010). Forecasting photovoltaic array power production subject to mismatch losses. *Solar energy*, 84(7), 1301–1309.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.04.009>

3. Balato, M., Costanzo, L., & Vitelli, M. (2015). Series–Parallel PV array re-configuration: Maximization of the extraction of energy and much more. *Applied energy*, 159, 145–160.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.073>

4. Cipriani, G., Di Dio, V., La Manna, D., Miceli, R., & Galluzzo, G. R. (2014, March). Technical and economical comparison between different topologies of PV plant under mismatch effect. In *2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)* (pp. 1–6). IEEE.

[https://DOI: 10.1109/EVER.2014.6844089](https://doi.org/10.1109/EVER.2014.6844089)

5. Krishna, G. S., & Moger, T. (2019). Improved SuDoKu reconfiguration technique for total-cross-tied PV array to enhance maximum power under partial shading conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *109*, 333–348. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.037>

6. Seyedmahmoudian, M., Horan, B., Soon, T. K., Rahmani, R., Oo, A. M. T., Mekhilef, S., & Stojcevski, A. (2016). State of the art artificial intelligence-based MPPT techniques for mitigating partial shading effects on PV systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *64*, 435–455.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.053>

7. Pendem, S. R., & Mikkili, S. (2018). Modelling and performance assessment of PV array topologies under partial shading conditions to mitigate the mismatching power losses. *Solar Energy*, *160*, 303–321.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.12.010>

8. Patel, H., & Agarwal, V. (2008). MATLAB-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics. *IEEE transactions on energy conversion*, *23*(1), 302–310.

<https://DOI: 10.1109/TEC.2007.914308>

9. Wang, Y. J., & Hsu, P. C. (2011). An investigation on partial shading of PV modules with different connection configurations of PV cells. *Energy*, *36*(5), 3069–3078.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.02.052>

10. Christabel, S. C., Srinivasan, A., Winston, D. P., & Kumar, B. P. (2016). Reconfiguration solution for extracting maximum power in the aged solar PV systems. *J. Electr. Eng*, *16*(3), 440–446.

https://www.researchgate.net/publication/319502192_Reconfiguration_solution_for_extracting_maximum_power_in_the_aged_solar_PV_systems

11. Ramaprabha, R., & Mathur, B. L. (2012). A comprehensive review and analysis of solar photovoltaic array configurations under partial shaded conditions. *International Journal of Photoenergy*, 2012(1), 120214.

<https://doi.org/10.1155/2012/120214>

12. Velasco-Quesada, G., Guinjoan-Gispert, F., Piqué-López, R., Román-Lumbreras, M., & Conesa-Roca, A. (2009). Electrical PV array reconfiguration strategy for energy extraction improvement in grid-connected PV systems. *IEEE transactions on industrial electronics*, 56(11), 4319–4331.

<https://DOI: 10.1109/TIE.2009.2024664>

13. Bhatnagar, P., & Nema, R. K. (2013). Maximum power point tracking control techniques: State-of-the-art in photovoltaic applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, 23, 224–241.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.011>

14. Rani, B. I., Ilango, G. S., & Nagamani, C. (2013). Enhanced power generation from PV array under partial shading conditions by shade dispersion using Su Do Ku configuration. *IEEE Transactions on sustainable energy*, 4(3), 594-601. <https://DOI: 10.1109/TSTE.2012.2230033>

15. Chao, K. H., Lai, P. L., & Liao, B. J. (2015). The optimal configuration of photovoltaic module arrays based on adaptive switching controls. *Energy Conversion and Management*, 100, 157–167.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.080> Get rights and content

16. Roman, E., Alonso, R., Ibañez, P., Elorduizapatarietxe, S., & Goitia, D. (2006). Intelligent PV module for grid-connected PV systems. *IEEE Transactions on Industrial electronics*, 53(4), 1066–1073.

<https://DOI: 10.1109/TIE.2006.878327>

17. Dhople, S. V., Ehlmann, J. L., Davoudi, A., & Chapman, P. L. (2010, September). Multiple-input boost converter to minimize power losses due to partial shading in photovoltaic modules. In *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition* (pp. 2633-2636). IEEE.

<https://DOI: 10.1109/ECCE.2010.5618013>

18. Koutroulis, E., & Blaabjerg, F. (2012). A new technique for tracking the global maximum power point of PV arrays operating under partial-shading conditions. *IEEE journal of photovoltaics*, 2(2), 184–190.

[https://DOI: 10.1109/JPHOTOV.2012.2183578](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2012.2183578)

19. Winston, D. P., Kumaravel, S., Kumar, B. P., & Devakirubakaran, S. (2020). Performance improvement of solar PV array topologies during various partial shading conditions. *Solar Energy*, 196, 228–242.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.12.007>

20. Sahoo, S. K. (2016). Renewable and sustainable energy reviews solar photovoltaic energy progress in India: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 927–939.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.049>

21. Ramli, M. A., Twaha, S., Ishaque, K., & Al-Turki, Y. A. (2017). A review on maximum power point tracking for photovoltaic systems with and without shading conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 144–159.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.013>

22. Ahmad, R., Murtaza, A. F., Sher, H. A., Shami, U. T., & Olalekan, S. (2017). An analytical approach to study partial shading effects on PV array supported by literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 721–732. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.078>

23. Kandemir, E., Cetin, N. S., & Borekci, S. (2017). A comprehensive overview of maximum power extraction methods for PV systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 78, 93–112.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.090>

24. Winston, D. P., Kumar, B. P., Christabel, S. C., Chamkha, A. J., & Sathyamurthy, R. (2018). Maximum power extraction in solar renewable power system-a bypass diode scanning approach. *Computers & Electrical Engineering*, 70, 122–136.

<https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2018.02.034>

25. Protection of photovoltaic systems. ETI Greenprotect GREEN PROTECT

<http://www.eti.si/images/userfiles/en-GB/documents/productsUltraquick/PV.pdf>.

26. Tonkoshkur, A., Ivanchenko, A., Nakashydze, L., Lyashkov, A., & Gomilko, I. (2021). Application of polymer posistor nanocomposites in systems for protecting photovoltaic components of solar arrays from electrical overloads. International Science Group.

<https://doi: 10.46299/978-1-63972-054-5>

27. Silvestre, S., Boronat, A., & Chouder, A. (2009). Study of bypass diodes configuration on PV modules. *applied energy*, 86(9), 1632–1640.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.01.020>

28. Daliento, S., Di Napoli, F., Guerriero, P., & d’Alessandro, V. (2016). A modified bypass circuit for improved hot spot reliability of solar panels subject to partial shading. *Solar Energy*, 134, 211–218.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.001>

29. Kim, K. A., & Krein, P. T. (2015). Reexamination of photovoltaic hot spotting to show inadequacy of the bypass diode. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5(5), 1435–1441.

<https://DOI: 10.1109/JPHOTOV.2015.2444091>

30. Kim, K. A., & Krein, P. T. (2013, June). Photovoltaic hot spot analysis for cells with various reverse-bias characteristics through electrical and thermal simulation. In *2013 IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)* (pp. 1–8). IEEE.

<https://DOI: 10.1109/COMPEL.2013.6626399>

31. Acciari, G., Graci, D., & La Scala, A. (2010). Higher PV module efficiency by a novel CBS bypass. *IEEE transactions on power electronics*, 26(5), 1333–1336.

<https://DOI: 10.1109/TPEL.2010.2095469>

32. 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: 10.1109/JPHOTOV.2013.2282736>

33. Solórzano, J., & Egido, M. A. (2014). Hot-spot mitigation in PV arrays with distributed MPPT (DMPPT). *Solar Energy*, *101*, 131–137.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.12.020>

34. Kim, K. A., Krein, P. T., Seo, G. S., & Cho, B. H. (2013, March). Photovoltaic ac parameter characterization for dynamic partial shading and hot spot detection. In *2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. 109–115). IEEE.

<https://DOI: 10.1109/APEC.2013.6520194>

35. Sánchez-Pacheco, F. J. (2015). Photovoltaic systems distributed monitoring for performance optimization.

<http://hdl.handle.net/10630/9922>

36. Di Napoli, F., Guerriero, P., d'Alessandro, V., & Daliento, S. (2015). Single-panel voltage zeroing system for safe access on PV plants. *IEEE Journal of Photovoltaics*, *5*(5), 1428–1434.

<http://DOI: 10.1109/JPHOTOV.2015.2448416>

37. Schmidt, H., & Roth, W. (2012). *U.S. Patent Application No. 13/402,992*.

<https://patents.google.com/patent/US20120194003/en>

38. Resadi, M., Costa, S., & Cesana, M. (2010). *U.S. Patent Application No. 12/548,756*.

<https://patents.google.com/patent/US20100057266A1/en>

39. Sánchez-Pacheco, F. J., Sotorrío-Ruiz, P. J., Heredia-Larrubia, J. R., Pérez-Hidalgo, F., & de Cardona, M. S. (2014). PLC-based PV plants smart monitoring system: field measurements and uncertainty estimation. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, *63*(9), 2215–2222.

<http://DOI: 10.1109/TIM.2014.2308972>

40. Gupta, T. K. (1990). Application of zinc oxide varistors. *Journal of the American Ceramic Society*, *73*(7), 1817–1840.

<https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb05232.x>

41. Buchanan, R. C. (Ed.). (2018). *Ceramic materials for electronics*. CRC press.

<https://www.routledge.com/Ceramic-Materials-for-Electronics/Buchanan/p/book/9780367394134?srsIid=AfmBOo>

q5bOgTVYcug6ZdHeCvjkye_hwGlfUEGrfnmrnpZEYAKWYG
WkSw

42. Gretzke, W. (2003). Use of polyswitch PPTC protection in automotive applications. In *42 V-PowerNets* (pp. 75–87). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

https://doi.org/10.1007/978-3-642-18139-9_4

43. Golubovic, B., Becker, P. N., & Moore, R. P. (2010). *U.S. Patent No. 7,660,096*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

<https://patents.google.com/patent/US7660096B2/en>

44. Tonkoshkur, A. S., & Ivanchenko, A. V. (2019). Electrical properties of structures based on varistor ceramics and polymer nanocomposites with carbon filler. *Journal of Advanced Dielectrics*, 9(03), 1950023.

<https://doi.org/10.1142/S2010135X19500231>

45. Köntges, M., Kurtz, S., Packard, C. E., Jahn, U., Berger, K. A., Kato, K., ... & Friesen, G. (2014). Review of failures of photovoltaic modules.

<http://repository.supsi.ch/id/eprint/9645>

46. Тонкошкур, О., & Накашидзе, Л. (2018). Проблеми надійності фотоелектричних компонентів сонячних батарей. *Vidnovluvana energetika*, 3 (54), 21-30.

<https://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/164>

47. Standler, R. B. (2012). *Protection of electronic circuits from overvoltages*. Courier Corporation.

https://books.google.com.ua/books/about/Protection_of_Electronic_Circuits_from_O.html?id=5-NEmE1EhYQC&redir_esc=y

48. Ivanchenko, A. V., Tonkoshkur, A. S., & Mazurik, S. V. (2019). Application of varistor-positistor structure for protection from overvoltages of photovoltaic cells of solar arrays. *Journal of physics and electronics*, (27 (1)), 79–88.

<https://doi.org/10.15421/331913>

49. Lee, C. G., Shin, W. G., Lim, J. R., Kang, G. H., Ju, Y. C., Hwang, H. M., ... & Ko, S. W. (2021). Analysis of electrical and thermal characteristics of PV array under mismatching conditions caused by partial shading and short circuit failure of bypass diodes. *Energy*, 218, 119480.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119480>

50. Тонкошкур О. С., Іванченко О. В. (2021) Застосування шару на основі матеріалів з фазовим переходом «метал-напівпровідник» для електротеплового захисту сонячних елементів. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, (3–4), 57–64.

<http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2021.3-4.57>

51. Колбунов В. Р., Тонкошкур О. С., Мазурик С. В., Ляшков О. Ю., Накашидзе Л. В. (2023) Захист сонячних батарей від перегрівів за допомогою критичних терморезисторів на основі діоксиду ванадію. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, (3–4), 16–19.

<http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2023.3-4.1>

52. Колбунов В. Р., Тонкошкур О. С., Накашидзе Л. В. (2024). Особливості електротеплового захисту сонячних модулів на основі байпасних критичних терморезисторів. *Vidnovluyana energetika*, (1 (76)), 43–50.

[https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1\(76\).43-50](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1(76).43-50)

53. Zhong, X., LeClair, P., Sarker, S. K., & Gupta, A. (2012). Metal-insulator transition in epitaxial VO₂ thin films on TiO₂ (100). *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 86(9), 094114.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.094114>

54. Pergament, A. L., Stefanovich, G. B., & Velichko, A. (2013). Oxide electronics and vanadium dioxide perspective: A review. *Journal on Selected Topics in Nano Electronics and Computing*, 1(1), 24–43.

https://www.researchgate.net/publication/259334513_Oxide_Electronics_and_Vanadium_Dioxide_Perspective_A_Review

55. Nordquist, C. D., Leonhardt, D., Custer, J. O., Jordan, T. S., Wolfley, S. L., Scott, S. M., ... & Rodenbeck, C. T. (2018, July). Power handling of vanadium dioxide metal-insulator transition RF limiters. In *2018 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)* (pp. 1–3). IEEE.

<http://DOI: 10.1109/IMWS-AMP.2018.8457150>

56. Pan, K., Wang, W., Shin, E., Freeman, K., & Subramanyam, G. (2015). Vanadium oxide thin-film variable resistor-based RF switches. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 62(9), 2959–2965.

[http://DOI: 10.1109/TED.2015.2451993](http://doi.org/10.1109/TED.2015.2451993)

57. Soltani, M., & Kaye, A. B. (2015). Properties and applications of thermochromic vanadium dioxide smart coatings. In *Intelligent Coatings for Corrosion Control* (pp. 461-490). Butterworth-Heinemann.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411467-8.00013-1>

58. Li, L., Wang, W., Shin, E., Quach, T., & Subramanyam, G. (2017, June). Design of tunable shunt and series interdigital capacitors based on vanadium dioxide thin film. In *2017 IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)* (pp. 279–283). IEEE.

[http://DOI: 10.1109/NAECON.2017.8268785](http://doi.org/10.1109/NAECON.2017.8268785)

59. Givernaud, J., Crunteanu, A., Orlianges, J. C., Pothier, A., Champeaux, C., Catherinot, A., & Blondy, P. (2010). Microwave power limiting devices based on the semiconductor-metal transition in vanadium-dioxide thin films. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 58(9), 2352–2361.

[http://DOI: 10.1109/TMTT.2010.2057172](http://doi.org/10.1109/TMTT.2010.2057172)

Розділ 2

ТЕРМОРЕЗИСТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ НА ОСНОВІ ДІОКСИДУ ВАНАДІЮ ТА ЇХ ФІЗИКО- ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

2.1 Фазовий перехід метал–ізолятор у діоксиді ванадію

Фазовий перехід метал-ізолятор (ФПМІ) відбувається зворотно без зміни агрегатного стану речовини при температурі T , яка називається температурою фазового переходу. Він супроводжується різкою зміною величини і характеру електропровідності. Електропровідність такого матеріалу нижче T_{tr} змінюється з температурою за експоненціальним законом, як у напівпровідниках і діелектриках, а вище T_{tr} – слабо зменшується з температурою, як у металах. Потрібно, однак, зазначити, що в цілому ряді випадків має місце відхилення поведінки електропровідності від «чисто» напівпровідникової при $T < T_{tr}$ і «чисто» металевій при $T > T_{tr}$, хоча характерна риса ФПМІ така як стрибкоподібна (на порядки) зміна електропровідності в області температури T_{tr} – зберігається.

Зараз відома велика кількість сполук із фазовим переходом метал-ізолятор. Найвідомішою із них є діоксид ванадію (VO_2). Чистий стехіометричний діоксид ванадію проявляє ФПМІ при температурі $T_{tr} = 68^\circ\text{C}$ [1]. Цей фазовий перехід типу «тверде тіло – тверде тіло» супроводжується перебудовою кристалічної структури діоксиду ванадію від моноклінної до тетрагональної [1, 2]. Величина різкої зміни електропровідності при ФПМІ для VO_2 , отриманого різними способами, становить від 10^2 до 10^5 разів [3 – 5].

Нижче температури фазового переходу T_{tr} VO_2 перебуває в напівпровідниковій фазі з моноклінною структурою, що належить до просторової групи $P2_1/c$ ($C5_{2h}$) [1, 2]. Вище T_{tr} VO_2 перебуває в металевій фазі з тетрагональною структурою типу рутилу й просторовою групою $P4_2/mnm$ (D^{14}_{4h}) [2, 6].

Елементарні комірки кристалічної решітки діоксиду

ванадію нижче й вище температури фазового переходу метал-ізолятор показані на рис. 2.1 [2].

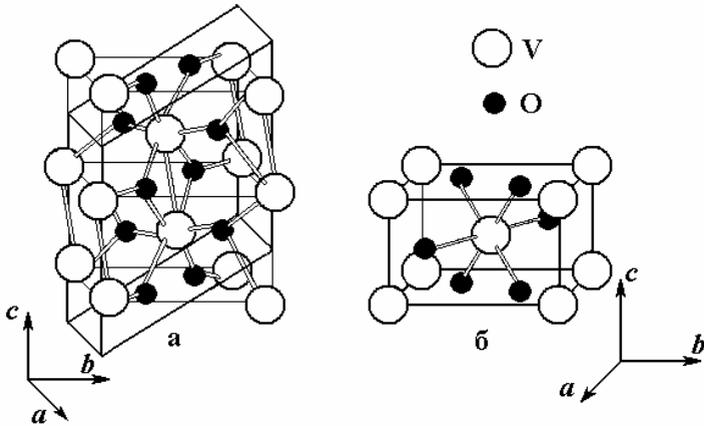


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення елементарної комірки для моноклінної (а) та тетрагональної (б) структур діоксиду ванадію

Нижче температури $T_{tr} = 68^{\circ}\text{C}$ елементарна комірка (рис. 2.1 а) має параметри: $a = 5,743 \text{ \AA}$, $b = 4,517 \text{ \AA}$, $c = 5,375 \text{ \AA}$ [7]. Вона містить 12 атомів: 4 атоми ванадію та 8 атомів кисню. Кожний атом ванадію перебуває усередині кисневого октаедра VO_6 . Цей октаедр деформований і має три відстані V-O в інтервалі $1,76\text{--}1,87 \text{ \AA}$ і три відстані V-O в інтервалі $2,01\text{--}2,05 \text{ \AA}$ з кутами, що змінюються від 78° до 99° [8]. Найближчі VO_6 октаедри зв'язані між собою через ребра або кути, як можна бачити на рис. 2.1 а. Як результат, кожен атом кисню є частиною трьох октаедрів VO_6 та має трикратну координацію з найближчими атомами ванадію.

Вище температури $T_{tr} = 68^{\circ}\text{C}$ елементарна комірка (рис. 2.1 б) має параметри: $a=b=4,555 \text{ \AA}$, $c=2,851 \text{ \AA}$ [7]. Він містить 6 атомів: 2 атоми ванадію та 4 атоми кисню. Кожний атом ванадію, як і у низькотемпературній фазі VO_2 , перебуває усередині кисневого октаедра VO_6 . Цей октаедр

має орторомбічну симетрію. Найближчі до осі c октаедри, об'єднані між собою через ребра, утворюють ланцюжки октаедрів. Ці ланцюжки з'єднуються між собою через кути октаедрів. Відстань V-O в VO_6 -октаедрі металевої фази VO_2 становить $\sim 1,93 \text{ \AA}$ [2].

Як видно на рис. 2.1, при переході діоксиду ванадію з металевої в напівпровідникову фазу відбувається спотворення кристалічної решітки, у результаті чого її період уздовж осі c подвоюється. Ці спотворення можна звести до двох змін кристалічної решітки:

- атоми ванадію попарно зближуються між собою в напрямку осі c ;

- атоми ванадію, що перебувають у парі, зміщуються із центрів їх VO_6 -октаедрів у протилежних напрямках, перпендикулярних осі c . Цей ефект одержав назву «твістування» [1].

Питання про механізм фазового переходу метал-ізолятор у діоксиді ванадію дотепер залишається дискусійним. Дискусії ведуться, в основному, навколо питання: що викликає фазовий перехід електронно-електронна взаємодія або електронно-фононна взаємодія.

Автори робіт [9, 10], ґрунтуючись на результатах експериментальних досліджень та теоретичному аналізі, висувають доводи на користь того, що рушійною силою ФПМІ у діоксиді ванадію є електронно-електронна взаємодія, тобто механізм фазового переходу Мотт-Хаббарда. Автори робіт [11, 12], також ґрунтуючись на результатах теоретичних і експериментальних досліджень, висувають доводи на користь електронно-фононної взаємодії, як рушійної сили ФПМІ, тобто вважають, що механізм фазового переходу відповідає моделі Пайерлса.

Швидше за все, обидва типи взаємодій роблять свій внесок у ФПМН VO_2 . Механізми переходу, що враховують спільний внесок кулонівської взаємодії між електронами й розщеплення енергетичних рівнів $3d$ електронів кристалічним полем, обговорюються в роботах [13 – 15].

Таким чином, з урахуванням вищевикладеного можна зробити висновок, що дотепер природа фазового переходу

метал-ізолятор у діоксиді ванадію не одержала однозначної інтерпретації. Очевидно, рішення цього питання вимагає подальших досліджень та постановки тонких експериментів.

Яскравою рисою фазового переходу метал-ізолятор, що відкриває різні можливості його практичного використання, є різка зміна фізичних властивостей: електропровідності, магнітної сприйнятливості, оптичних характеристик, лінійних розмірів і ін.

Як відомо [16 – 17], стрибок електропровідності VO_2 в області температури T_{tr} фазового переходу метал-ізолятор залежно від якості кристалів і плівок цієї сполуки може становити від 10^2 до $10^5 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$. На температурній залежності електропровідності $\sigma(T)$ у області поблизу температури T_{tr} спостерігається гістерезис, що проявляється як розбіжність кривих $\sigma(T)$, вимірених при нагріванні й охолодженні зразка. Ширина петлі температурного гістерезису для відомих кристалів і плівок VO_2 звичайно не перевищує 2 К [16, 17], для полікристалічних зразків діоксиду ванадію й недосконалих плівок може бути на порядок більше [1, 19]. Як вже неодноразово відмічалось, нижче температури T_{tr} температурна залежність електропровідності діоксиду ванадію проявляє типовий для напівпровідників та діелектриків активаційний характер. Величина енергії активації електропровідності для зразків VO_2 різного походження може становити від 0,12 еВ до 0,25 еВ [1, 18, 19].

У тому випадку, коли питома електропровідність VO_2 вище температури T_{tr} і перевищує $10^3 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$, має місце чисто металева поведінка, тобто із збільшенням температури електропровідність знижується [1]. Це стосується кристалів і плівок VO_2 зі стрибком електропровідності при ФПМІ не менше $10^4 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$. У тому випадку, якщо питома електропровідність металевої фази VO_2 менше $10^3 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$, характер температурної залежності електропровідності змінюється. Поведінка електропровідності при варіації температури стає ближчою до активаційної, що характерно для напівпровідників. Як зазначено в [1], перехід від металевого характеру поведінки до активаційного у

високотемпературній фазі VO_2 пов'язаний з виникненням структурної неупорядкованості, внесеної різними способами підготовки цієї сполуки. Експерименти показали, що у плівках VO_2 , як правило, не спостерігається чисто металевої поведінки електропровідності вище температури T_{tr} , що пов'язано зі значною щільністю структурних дефектів у них. Виняток становлять високоякісні плівки з орієнтованими кристалітами VO_2 , які мають малу щільність структурних дефектів [17].

Стрибок електропровідності при ФПМІ у діоксиді ванадію знайшов застосування у критичних терморезисторах. Уперше такі терморезистори були розроблені Футакі [20]. Вони мали стрибок електропровідності на 2 - 4 порядки в області температури 68°C . Для виготовлення терморезисторів Футакі використовував суміш V_2O_5 з кислотними (B, Si або P) або основними (Mg, Ca, Sr або Ba) оксидами. Суміш зазначених оксидів обпикалася у відбудовній атмосфері для відновлення пентаоксиду ванадію до діоксиду ванадію.

2.2. Терморезистивний матеріал на основі склокераміки VO_2 –ВФС–Cu та особливості технології його виготовлення

Основним недоліком монокристалічних і плівкових матеріалів на основі діоксиду ванадію є досить невеликі ($<1\text{ A}$) струми, що можуть витримувати ці структури [21 – 24]. Ця проблема розв'язується створенням відповідних керамічних і полімерних композиційних матеріалів.

Для поліпшення електричного зв'язку між кристалітами VO_2 у склокераміці, за рахунок зниження ізолюючої дії ВФС (ванадієво-фосфатного скла), були синтезовані склади склокераміки із провідними добавками [25]. У якості таких добавок використовували порошки міді, цинку й алюмінію. Найкращий ефект було досягнуто при введенні до складу склокераміки міді. Добавки цинку й алюмінію знижують величину стрибка електропровідності VO_2 при температурі ФПМІ.

На рис. 2.2 для порівняльного аналізу наведено температурні залежності електропровідності стиснутого порошку VO_2 , склокераміки складу $85\text{VO}_2\text{--}15\text{ВФС}$ (ванадієво-фосфатне скло) та $80\text{VO}_2\text{--}15\text{ВФС--}5\text{Cu}$.

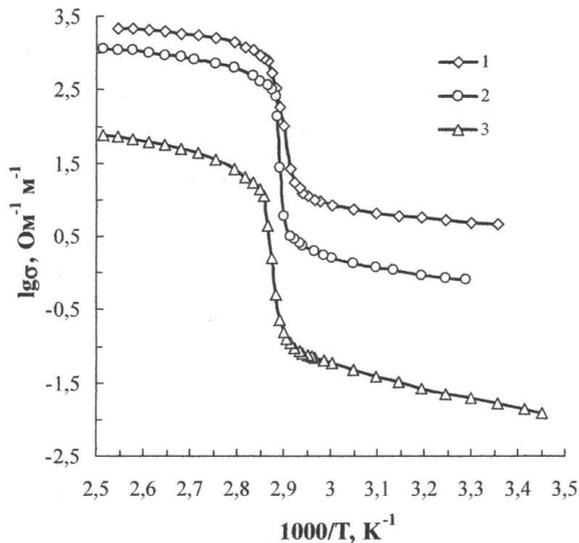


Рисунок 2.2 Температурні залежності електропровідності порошку VO_2 (2) і склокераміки складів $80\text{VO}_2\text{--}15\text{ВФС--}5\text{Cu}$ (1) і $85\text{VO}_2\text{--}15\text{ВФС}$ (3)

Як видно, склад з добавкою міді має більш високу питому електропровідність σ , ніж склад без добавки міді. Установлено, що для склокераміки з добавкою міді розкид величини σ між різними партіями зразків значно менший, ніж у випадку склокераміки без добавки міді. В області температури T_{tr} всі склади склокераміки системи $\text{VO}_2\text{--ВФС--Cu}$ із вмістом Cu у межах 2–7 ваг.% мали стрибок σ , зумовлений ФПМІ у VO_2 .

З табл. 2.1 видно, що склокераміка $80\text{VO}_2\text{--}15\text{(ВФС)--}5\text{Cu}$ має більш високу електропровідність, ніж кристалічний порошок VO_2 , хоча в ньому об'ємний вміст VO_2 (~73 об.%) вищий, ніж у

склокераміці (~54,7 об. %). Така особливість свідчить про важливу роль контактів між кристалітами VO_2 для електропровідності й показує, що добавка міді поліпшує електричні зв'язки між кристалітами VO_2 .

Таблиця 2.1 Електричні параметри кристалічного порошку VO_2 і складів склокераміки, синтезованих на його основі

Електричні параметри	Склад, ваг.%		
	Порошок VO_2	85 VO_2 15 ВФС	80 VO_2 – 15 ВФС– Cu
Питома електрична провідність σ при 20°C, $\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$	0,60	$1,58 \cdot 10^{-2}$	4,27
Питома електрична провідність σ при 120°C, $\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$	1120	72	2170
Стрибок провідності при ФПМІ $\lg(\sigma_m/\sigma_s)$	2,60	2,46	2,23
Енергія активації електропровідності нижче T_{tr} , еВ	0,20	0,32	0,12
Енергія активації електропровідності вище T_{tr} , еВ	0,08	0,16	0,08

Введення міді до складу склокераміки знижує енергію активації електропровідності нижче температури ФПМІ. Однак енергія активації σ вище T_{tr} у трикомпонентній кераміці така ж, як і у кристалічного порошку VO_2 .

На рис. 2.3 показано температурні залежності σ для ряду складів склокераміки (ваг.%) $(85-\alpha)\text{VO}_2-15 \text{ВФС}-\alpha\text{Cu}$.

Таким чином, добавка міді значно впливає на електропровідність і величину її різкої зміни в області температури ФПМІ. Електропровідність склокераміки нижче

T_{tr} змінюється більш ніж у 10^5 разів і вище T_{tr} – приблизно в 100 разів, коли вміст міді змінюється в інтервалі $0 \leq \alpha \leq 15$ ваг.%. Різка зміна σ , яка зумовлена фазовим переходом у VO_2 , слабо виражена на температурній залежності електропровідності склокераміки, коли вміст добавки міді α перевищує 10 ваг.%.

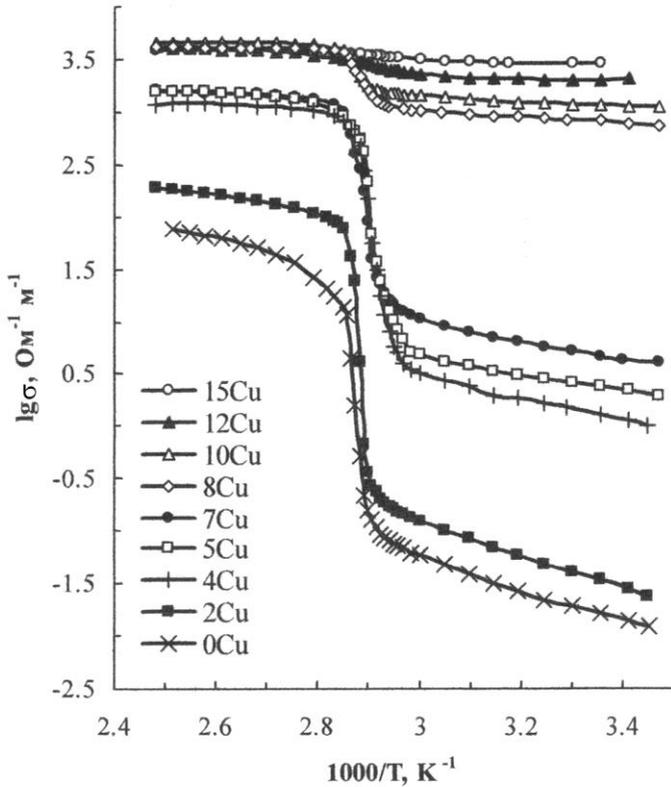


Рисунок 2.3 Температурні залежності питомої електропровідності склокераміки $(85-\alpha) \text{VO}_2-15 \text{ВФС}-\alpha \text{Cu}$ з різним вмістом міді α

На рис. 2.4 представлено питомі електропровідності σ склокераміки $(85-\alpha) \text{VO}_2-15 \text{ВФС}-\alpha \text{Cu}$ за температур 20°C

і 120°C , як функції вмісту міді α , а така ж подібна залежність для величини стрибка електропровідності $\lg(\sigma_m/\sigma_s)$ при фазовому переході у VO_2 .

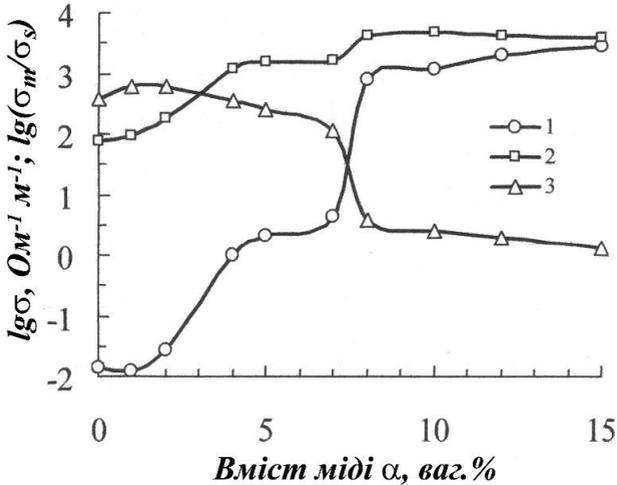


Рисунок 2.4 Залежності питомої електропровідності за температур 20°C (1), 120°C (2) і величини зміни електропровідності $\lg(\sigma_m/\sigma_s)$ при фазовому переході у VO_2 (3) від вмісту міді α у кераміці $(85-\alpha)\text{VO}_2-15 \text{ВФС}-\alpha\text{Cu}$

Поведінка σ склокераміки $(85-\alpha)\text{VO}_2-15 \text{ВФС}-\alpha\text{Cu}$ при зміні α має однаковий характер як нижче, так і вище T_{tr} . Однак електропровідність змінюється більше за температур нижче T_{tr} , чим за температури вище T_{tr} . На залежностях $\sigma(\alpha)$ можна виділити кілька областей. Области різкого збільшення σ із зростанням вмісту міді α , лежать в інтервалах $1 \text{ ваг.}\% \leq \alpha \leq 4 \text{ ваг.}\%$ і $7 \text{ ваг.}\% \leq \alpha \leq 8 \text{ ваг.}\%$. Области, де σ змінюється слабо, відповідають інтервалам вмісту міді $0 \text{ ваг.}\% \leq \alpha < 1 \text{ ваг.}\%$, $4 \text{ ваг.}\% < \alpha < 7 \text{ ваг.}\%$ і $8 \text{ ваг.}\% < \alpha < 15 \text{ ваг.}\%$.

Зміна електропровідності склокераміки $(85-$

α)VO₂-15 ВФС- α Cu при ФПМІ у VO₂ становить не менше 100 ($\lg(\sigma_m/\sigma_s) > 2$) за вмісту міді $\alpha \leq 7$ ваг.% (див. рис. 2.4). Величина цієї зміни різко падає до значення ~ 4 ($\lg(\sigma_m/\sigma_s) < 0,6$) в інтервалі вмісту міді $7 \text{ ваг.\%} \leq \alpha \leq 8 \text{ ваг.\%}$. Внесок фазового переходу VO₂ в електропровідність практично відсутній при $\alpha > 10$ ваг.%. У цьому випадку досліджувана склокераміка має високу питому електропровідність, яка практично не залежить від температури (див. рис. 2.3). Така поведінка характерна для матеріалів з металевим типом провідності.

Відповідно з даними табл. 2.2, при вмісті міді менше 7 ваг.% електропровідність досліджуваної склокераміки показує активаційний характер як нижче, так і вище температури ФПМІ у VO₂.

Таблиця 2.2 Температура різкої зміни електропровідності T_{tr} і енергія активації електропровідності нижче й вище T_{tr} у кераміці (85- α)VO₂-15 ВФС- α Cu

Склад кераміки: А – VO ₂ ; В – ВФС; С – Cu, ваг.%	$T_{tr}, ^\circ\text{C}$	Енергія активації електропровідності ΔE_a , еВ	
		нижче T_{tr}	вище T_{tr}
85А-15В	73	0,32	0,16
84А-15В-1С	73	0,29	0,16
83А-15В-2С	73	0,28	0,12
81А-15В-4С	72	0,20	0,09
80А-15В-5С	72	0,12	0,08
78А-15В-7С	72	0,11	0,054
77А-15В-8С	72	0,059	0,021
75А-15В-10С	–	0,039	–

Така поведінка характерна для напівпровідників. Енергія активації електропровідності ΔE_a нижче температури T_{tr} перевищує енергію активації

електропровідності в області температур вище T_{tr} . Величина ΔE_a зменшується, коли вміст міді α зростає (див. табл. 2.2). Значення ΔE_a нижче температури T_{tr} , при вмісті міді $\alpha \leq 2$ ваг.%, перевищує енергію активації електропровідності VO_2 у напівпровідниковій фазі, що становить $\sim 0,19\text{--}0,21$ еВ [1, 26]. У цих областях температури й вмісту добавки міді енергія активації електропровідності кераміки $(85\text{--}\alpha)\text{VO}_2\text{--}15$ ВФС $\text{--}\alpha\text{Cu}$ має значення близьке до енергії активації електропровідності ВФС $\Delta E_a \sim 0,33$ еВ [27, 28].

Компоненти мікроструктури кераміки $(85\text{--}\alpha)\text{VO}_2\text{--}15$ ВФС $\text{--}\alpha\text{Cu}$ мають різну питому електричну провідність. Найвищі значення σ мають VO_2 у металевій фазі й оксид V_5O_9 . Електропровідність VO_2 навіть у напівпровідниковій фазі не менше ніж у 100 разів більша електропровідності скла (мол. %) $80 \text{V}_2\text{O}_5\text{--}20 \text{P}_2\text{O}_5$. Тому прошарки ВФС між кристалітами VO_2 електрично ізолюють кристаліти VO_2 один від одного.

Потрібно зазначити, що розчинення міді у ВФС при синтезі склокераміки повинне збільшувати електропровідність скла за рахунок переходу валентних електронів з атомів розчиненої міді на іони V^{5+} у склі [27, 29]. У результаті збільшується концентрація іонів V^{4+} і, отже, концентрація носіїв заряду, які беруть участь у стрибковій електропровідності скла [29].

Також збільшення електропровідності ВФС при введенні добавки міді повинне зменшувати ізолюючу дію скла на кристаліти VO_2 . Тому на температурній залежності σ кераміки $(85\text{--}\alpha)\text{VO}_2\text{--}15$ – ВФС – αCu , при вмісті міді не більше 7 ваг.%, стабільно спостерігається стрибок електропровідності в області температури T_{tr} , що становить не менше двох порядків (див. рис. 2.4, крива 3). Таким чином, розчинення міді у ВФС дозволяє пояснити збільшення σ склокераміки $(85\text{--}\alpha)\text{VO}_2\text{--}15$ ВФС $\text{--}\alpha\text{Cu}$ (рис. 2.3) і зниження енергії активації σ при $T < T_{tr}$ (табл. 2.2), коли вміст міді збільшується в інтервалі $1 \text{ ваг.}\% \leq \alpha \leq 5 \text{ ваг.}\%$.

При $\alpha > 7$ ваг.% різке збільшення електропровідності

й зниження величини її стрибка $lg(\sigma_m/\sigma_s)$ при фазовому переході в VO_2 , (див. рис. 2.4) відповідає даним рентгенофазового аналізу (РФА), які показали інтенсивне утворення V_5O_9 при вмісті міді більше 7 ваг.%. У рамках теорії протікання [30], поведінку σ і $lg(\sigma_m/\sigma_s)$ в інтервалі вмісту міді $7 \text{ ваг.}\% \leq \alpha \leq 8 \text{ ваг.}\%$ можна пояснити виникненням у склокераміці $(85-\alpha)VO_2-15(\text{ВФС})-\alpha\text{Cu}$ протікання по провідній фазі V_5O_9 . Тому при $\alpha > 7 \text{ ваг.}\%$ значний внесок в електропровідність склокераміки $(85-\alpha)VO_2-15(\text{ВФС})-\alpha\text{Cu}$ вносить канал провідності по цьому компоненту. Він чинить шунтуючу дію на канал провідності, сформований кристалітами VO_2 . Така дія, як видно з даних рис. 2.3 і рис. 2.4, більше проявляється нижче температури T_w , коли кристаліти VO_2 перебувають у напівпровідниковій фазі. Наслідком шунтуючої дії каналу провідності по V_5O_9 є зменшення величини стрибка електропровідності в області температури фазового переходу метал – напівпровідник у VO_2 .

Таким чином, для забезпечення різкої зміни електропровідності не менше ніж у 100 разів, при ФПМІ у діоксиді ванадію, вміст добавки міді у склокерамічних матеріалах на його основі не повинен перевищувати 5 ваг.%.

2.3. Модель електропровідності кераміки на основі VO_2 і скла системи $V_2O_5-P_2O_5$

Для якісного опису електропровідності склокераміки $(85-\alpha)VO_2-15 \text{ ВФС}-\alpha\text{Cu}$ при $\alpha < 7 \text{ ваг.}\%$ можна скористатися простою моделлю гетерогенної структури (рис. 2.5а). Ця модель не враховує пористість склокераміки. Кристаліти VO_2 у моделі мають кубічну форму (заштриховані) і розташовані впорядковано. Довжина ребра куба l_v дорівнює усередненому розміру l_c кристалітів VO_2 (за даними мікроструктурних досліджень $l_c \sim 35 \text{ мкм}$ [31]). Кубічні кристаліти розділяють прошарки скла з товщиною l_g , які не перевищують 1–2 мкм. Прямі зв'язки між кристалітами VO_2 враховані в моделі заштрихованими

перемичками. Ці перемички моделюють провідні електричні зв'язки між кристалітами VO_2 . Передбачається, що всі перемички ідентичні й мають площу поперечного перерізу S_c .

Знайти зв'язок σ склокераміки з питомими електропровідностями її компонентів можна з еквівалентної електричної схеми фрагмента мікроструктури, виділеного пунктиром (рис. 2.5а). На рис. 2.5б показано цей фрагмент і його еквівалентну електричну схему. Питома електропровідність ВФС σ_g та геометричні розміри його визначають величину опорів R_{g1} і R_{g2} . Питома електропровідність діоксиду ванадію σ_v і геометричні розміри кристалітів VO_2 (l_v) та перемички між ними (l_g, S_c) визначають величину електричних опорів R_{v1} і R_{v2} . Далі припускається, що матеріал перемички має питому електропровідність σ_v . Внесок перемичок в опір R_{g1} можна не враховувати через його мізерність.

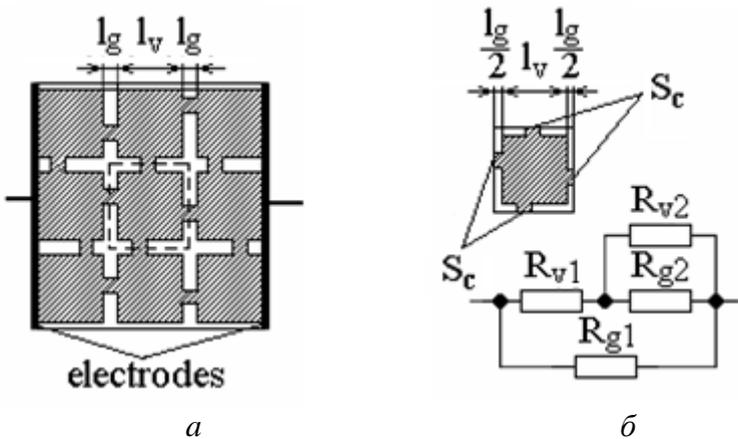


Рисунок 2.5 Модель мікроструктури кераміки (85- α) VO_2 -15 ВФС- α Cu (а), фрагмент мікроструктури та його еквівалентна електрична схема (б)

Для опорів R_{g1} , R_{g2} , R_{v1} і R_{v2} можна одержати:

$$\begin{aligned}
 R_{g1} &= \frac{1}{l_g \sigma_g} \left(2 + \frac{l_g}{l_v} \right) \\
 R_{g2} &= \frac{l_g}{\sigma_g ((l_v + l_g)^2 - S_c)} \\
 R_{v1} &= \frac{1}{\sigma_v l_v} \\
 R_{v2} &= \frac{l_g}{\sigma_v S_c}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

де l_g – товщина прошарку скла у мікроструктури кераміки;
 σ_g – питома електропровідність ванадієво-фосфатного скла;
 l_v – довжина ребра куба кристалітів VO_2 ;
 l_g – розміри перемички між ребрами куба кристалітів;
 S_c – площа поперечного перерізу перемичок в кристалітах;
 σ_v – питома електропровідність діоксиду ванадію.

Якщо використовувати ці співвідношення для розрахунку опору кола, зображеного на рис. 2.5б, і взяти до уваги, що $l_g \ll l_v$, $\sigma_g \ll \sigma_v$, то для питомої електропровідності кераміки (85-а) VO_2 –15 ВФС– α Su можна одержати таке співвідношення:

$$\sigma = \frac{\sigma_g l_g}{2l_v} + \sigma_v \left(1 + \frac{l_v l_g \sigma_v}{\sigma_g l_v^2 + \sigma_v S_c} \right)^{-1}
 \tag{2.2}$$

Співвідношення (2.2) дозволяє якісно проаналізувати поведінку питомої електропровідності склокераміки залежно від питомої електропровідності її компонентів і наявності прямих зв'язків між кристалітами VO_2 . При аналізі питома електропровідність VO_2 кристалітів у напівпровідниковій і металевій фазах позначається як σ_v і σ_{vm} , відповідно.

Важливим є визначити, при якій умові в області температури T_{tr} буде мати місце різка зміна електропровідності склокераміки, зумовлена фазовим переходом напівпровідник – метал у VO_2 .

Припустимо, що прямі контакти між кристалітами VO_2 у склокераміці відсутні ($S_c=0$) або виконуються умови $\sigma_g l_v^2 \gg \sigma_v S_c$, $\sigma_g l_v^2 \gg \sigma_{vm} S_c$. Тоді за умови $\sigma_v l_g \gg \sigma_g l_v$ співвідношення (2.2) буде мати вигляд (2.3):

$$\sigma = \frac{\sigma_g l_g}{2l_v} + \frac{\sigma_g l_v}{l_g} \approx \frac{\sigma_g l_v}{l_g} \quad (2.3)$$

У цьому випадку питома електропровідність ВФС σ_g визначає питому електропровідність склокераміки як вище, так і нижче температури T_{tr} . Тому $\sigma_S(T_{tr}) = \sigma_m(T_{tr})$ і різка зміна електропровідності склокераміки при ФПМІ у VO_2 не буде мати місце ($lg(\sigma_m/\sigma_S)=0$).

Якщо середня площа контактів S_c між кристалітами VO_2 задовольняє умовам $\sigma_g l_v^2 \gg \sigma_v S_c$, $\sigma_g l_v^2 \ll \sigma_{vm} S_c$, то для питомої електропровідності склокераміки σ_S при $T < T_{tr}$, буде справедливим співвідношення (2.2), а для питомої електропровідності σ_m при $T > T_{tr}$ з (2.2) можна одержати такий вираз (2.4):

$$\sigma_{cm} = \frac{\sigma_g l_g}{2l_v} + \frac{\sigma_{vm} S_c}{l_v l_g} \approx \frac{\sigma_{vm} S_c}{l_v l_g} \quad (2.4)$$

Таким чином, при ФПМІ діоксидно-ванадієва склокераміка буде зазнавати різкої зміни електропровідності. Величину цієї зміни, на підставі співвідношень (2.4) і (2.3), можна оцінити як:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_S} = \frac{\sigma_{vm}(T_t) S_c}{\sigma_g(T_t) l_v^2} \quad (2.5)$$

де $\sigma_{vm}(T_{tr})$ і $\sigma_g(T_{tr})$ питомі електропровідності за температури T_{tr} діоксиду ванадію в металевій фазі й у ванадієво-фосфатному склі.

Наявність різкої зміни σ склокераміки $(85-\alpha)\text{VO}_2-15\text{ВФС}-\alpha\text{Cu}$ в області температури T_{tr} (рис. 2.3) і фактичний збіг її енергії активації при $T < T_{tr}$ з ΔE_a ВФС $\sim 0,32-0,33$ еВ, коли $\alpha < 2$ ваг.% (див. табл. 2.2), підтверджує здійснимість умов $\sigma_g l_v^2 \gg \sigma_{vs} S_c$, $\sigma_g l_v^2 \ll \sigma_{vm} S_c$ і, отже, співвідношень (2.3) – (2.5).

Оскільки добавка міді збільшує питому електропровідність σ_g і знижує її енергію активації, це пояснює, з урахуванням співвідношення (2.3), поведінку питомої електропровідності σ_S склокераміки $(85-\alpha)\text{VO}_2-15\text{ВФС}-\alpha\text{Cu}$ при $T < T_{tr}$, в інтервалі вмісту міді $1 \text{ ваг.}\% \leq \alpha \leq 5 \text{ ваг.}\%$ (див. рис. 2.4, крива 1). Більш слабка залежність у цьому інтервалі від вмісту міді питомої електропровідності σ_m при $T > T_{tr}$ (див. рис. 2.4, крива 2) погоджується зі співвідношенням (2.4), що показує, що в цьому інтервалі температур в електропровідності домінує внесок питомої електропровідності VO_2 σ_{vm} , що не залежить від вмісту добавки міді.

Вираз (2.5) дозволяє оцінити, як змінюється відносна площа S_c/l_v^2 прямого контакту між кристалітами VO_2 , при варіації вмісту добавки міді α у кераміку.

Для такої оцінки використовували експериментальні значення відношення електропровідностей σ_m/σ_S (рис. 2.4, крива 3) і значення $\sigma_{vm}(T_{tr}) \sim 1000 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, що нескладно знайти з температурної залежності питомої електропровідності кристалічного порошку VO_2 .

Величина $\sigma_g(T_{tr})$ в (2.5) була розрахована відповідно (2.3).

З цією метою були використані значення питомої електропровідності склокераміки $\sigma_S(T_{tr})$ і величини $l_v \sim l_c \cong 35$ мкм, $l_g \cong 1,5$ мкм. Для визначення $\sigma_S(T_{tr})$ ділянку температурної залежності питомої електропровідності склокераміки при $T < T_{tr}$ (див. рис. 2.4) лінійно екстраполювали до температури $T = T_{tr}$.

Результати оцінки відносної площі контакту S_c/l_v^2 між кристалітами VO_2 у кераміку $(85-\alpha)\text{VO}_2-15\text{ВФС}-\alpha\text{Cu}$ залежно від вмісту міді α представлено на рис. 2.6. Можна бачити, що площа прямого електричного контакту S_c між кристалітами VO_2 у дослідженій кераміці становить лише невелику частину від площі контактної поверхні кристалітів l_v^2 . Як зазначалося вище, це зумовлено тим, що рідка фаза при синтезі склокераміки легко проникає між твердими частками, формуючи на заключному етапі синтезу слабопровідний прошарок скла, що розділяє кристаліти VO_2 . Контактна площа кристалітів S_c зростає при збільшенні вмісту міді (параметра α). Це свідчить про збільшення кількості прямих і провідних електричних зв'язків між кристалітами VO_2 . Причиною такої поведінки, очевидно, є збільшення електропровідності ванадієво-фосфатного скла.

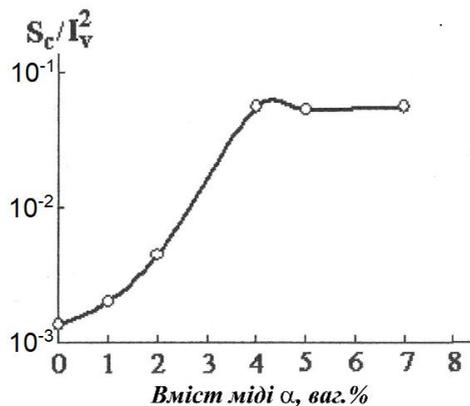


Рисунок 2.6 – Залежність відносної площі електричного контакту між кристалітами VO_2 у склокераміці $(85-\alpha)\text{VO}_2-15\text{ВФС}-\alpha\text{Cu}$ від вмісту міді α

Таким чином, добавка міді в кераміку на основі VO_2 і скла системи $\text{V}_2\text{O}_5-\text{P}_2\text{O}_5$ відіграє позитивну роль у її електричних властивостях, тому що сприяє поліпшенню електричних контактів між кристалітами VO_2 . Однак вміст

міді не повинен перевищувати 7 ваг.%, оскільки в цьому випадку відбувається зміна фазового складу склокераміки й вона втрачає властивості, зумовлені ФПМІ у діоксиді ванадію.

2.4 Електропровідність склокераміки систем $\text{VO}_2\text{-ВФС-МО}$ і $\text{VO}_2\text{-ВФС-Cu-МО}$ на постійному струмі

Склокерамічні матеріали на основі діоксиду ванадію, що належать системам $\text{VO}_2\text{-ВФС-МО}$ і $\text{VO}_2\text{-ВФС-Cu-МО}$, містять добавку оксиду металу МО. За оксидну добавку в складах склокераміки було використано SnO_2 , TiO_2 та ZnO .

Температурні залежності питомої електропровідності для двох складів кераміки $\text{VO}_2\text{-ВФС-SnO}_2$ представлено на рис. 2.7. У табл. 2.3 наведено деякі параметри цих матеріалів, знайдені за даними рис. 2.7 і розраховані на підставі формули (2.4).

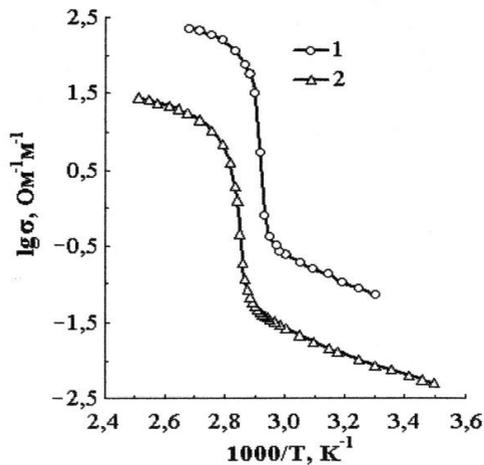


Рисунок 2.7 – Температурні залежності питомої електропровідності кераміки $75 \text{VO}_2\text{-15 ВФС-10 SnO}_2$ (1) і $65 \text{VO}_2\text{-15 ВФС-20 SnO}_2$ (2)

Як видно, ФПМІ у VO_2 дає значний внесок у σ склокераміки складу $\text{VO}_2\text{--ВФС--SnO}_2$. Електропровідність в області температури T_{tr} змінюється у таких керамічних матеріалах у 300–500 разів. Це погоджується з результатами РФА [31], які показали, що фазовий склад при синтезі склокераміки $\text{VO}_2\text{--ВФС--SnO}_2$ не змінюється, а, отже, вміст VO_2 також залишається незмінним.

Збільшення вмісту SnO_2 у складі склокераміки зрушує температуру різкої зміни електропровідності при ФПМІ T_{tr} в область вищих температур (табл. 2.3). Це відповідає результатам роботи [32], де показано, що введення олова у плівки VO_2 призводить до збільшення температури T_{tr} .

Значення енергії активації електропровідності кераміки $75 \text{VO}_2\text{--}15\text{--}10 \text{SnO}_2$ і $65\text{VO}_2\text{--}15 \text{ВФС--}20 \text{SnO}_2$ нижче й вище температури T_{tr} збігаються з відповідними значеннями для кераміки $(85\text{--}\alpha)\text{VO}_2\text{--}15 \text{ВФС--}\alpha \text{Cu}$ при $\alpha < 2$ ваг.% (див. табл. 2.2). Це свідчить про те, що в електропровідності склокераміки складу $\text{VO}_2\text{--ВФС--SnO}_2$ значну роль відіграє ванадієво-фосфатне скло, як і у склокераміці складу $\text{VO}_2\text{--ВФС--Cu}$ за невеликого вмісту міді.

Таблиця 2.3 Параметри склокераміки деяких складів у системі $\text{VO}_2\text{--ВФС--SnO}_2$

Склад, ваг.%	$T_{tr}, ^\circ\text{C}$	$\Delta E_a,$ ($T < T_{tr}$), еВ	$\Delta E_a,$ ($T > T_{tr}$), еВ	$\lg(\sigma_m/\sigma_S)$	σ_m/σ_S	$S/(l_V)^2$
$75 \text{VO}_2\text{--}15 \text{ВФС--}10 \text{SnO}_2$	70	0,32	0,16	2,66	460	$6,5 \cdot 10^{-3}$
$65\text{VO}_2\text{--}15 \text{ВФС--}20 \text{SnO}_2$	79	0,29	0,16	2,54	350	$6,4 \cdot 10^{-4}$

Площа прямих контактів між кристалітами VO_2 мала, за рахунок ізолюючої дії (ВФС), тому нижче температури T_{tr} скло вносить визначальний вклад в електропровідність кераміки $\text{VO}_2\text{--ВФС--SnO}_2$. Як наслідок, така склокераміка, в області температури нижче T_{tr} , має енергію активації електропровідності, яка збігається з енергією активації електропровідності скла $80\text{V}_2\text{O}_5\text{--}20\text{P}_2\text{O}_5$.

Представлені в табл. 2.3 розрахункові значення відносної середньої площі електричних контактів $S/(l_v)^2$ між кристалітами VO_2 малі й близькі до відповідних значень для кераміки $(85-\alpha)\text{VO}_2-15\text{ВФС}-\alpha\text{Cu}$ при невеликому вмісті міді (рис. 2.6).

Значення $S/(l_v)^2$ для кераміки $65\text{VO}_2-15\text{ВФС}-20\text{SnO}_2$ на порядок менше, ніж для кераміки $75\text{VO}_2-15\text{ВФС}-10\text{SnO}_2$.

Це свідчить про те, що збільшення вмісту SnO_2 у склокераміці зменшує площу прямих електричних контактів між кристалітами VO_2 .

Як видно на рис. 2.7, збільшення вмісту SnO_2 знижує питому електропровідність склокераміки. Причиною зниження σ є не тільки зменшення відносної площі прямих електричних контактів між кристалітами VO_2 , але також, імовірно, зниження питомої електропровідності ВФС, що заповнює простір між кристалітами VO_2 . Як показали дані мікроструктурних досліджень [31], ВФС проникає у простір між дрібнодисперсними частинками порошку SnO_2 (розміри частинок $\sim 1\text{ мкм}$), формуючи склокераміку системи ВФС– SnO_2 . Тому в склокерамічних матеріалах на основі діоксиду ванадію з добавкою SnO_2 простір між кристалітами VO_2 заповнює не тільки ванадієво-фосфатне скло, але й склокераміка складу ВФС– SnO_2 .

Для одержання інформації про електричні властивості такої склокераміки був синтезований керамічний матеріал (ваг.%) $85\text{SnO}_2-15\text{ВФС}$. Умови синтезу ті ж самі, що і для кераміки на основі VO_2 і ВФС.

Температурну залежність питомої електропровідності кераміки $85\text{SnO}_2-15\text{ВФС}$ наведено на рис. 2.8. Для порівняння на рис. 2.8 представлено аналогічну залежність для скла $80\text{V}_2\text{O}_5-20\text{P}_2\text{O}_5$.

Як видно, питома електропровідність ВФС приблизно на порядок більша, ніж питома електропровідність склокераміки $85\text{SnO}_2-15\text{ВФС}$. Тому в керамічних матеріалах на основі VO_2 і ВФС із добавкою діоксиду олова, прошарки, що розділяють кристаліти VO_2 , мають меншу

електропровідність, ніж у подібних матеріалах без добавки SnO_2 . З отриманих даних (рис. 2.8) видно, що енергії активації електропровідності ВФС і склокераміки $85 \text{ SnO}_2\text{--}15 \text{ ВФС}$ мають однакові значення $\sim 0,33 \text{ eV}$. Це свідчить про те, що основний внесок у електропровідність кераміки $85 \text{ SnO}_2\text{--}15 \text{ ВФС}$ робить скло. Тому варто очікувати, що введення добавки міді, яка, як було показано вище, збільшує електропровідність ванадієво-фосфатного скла, призведе також до збільшення електропровідності склокераміки системи $\text{SnO}_2\text{--ВФС}$.

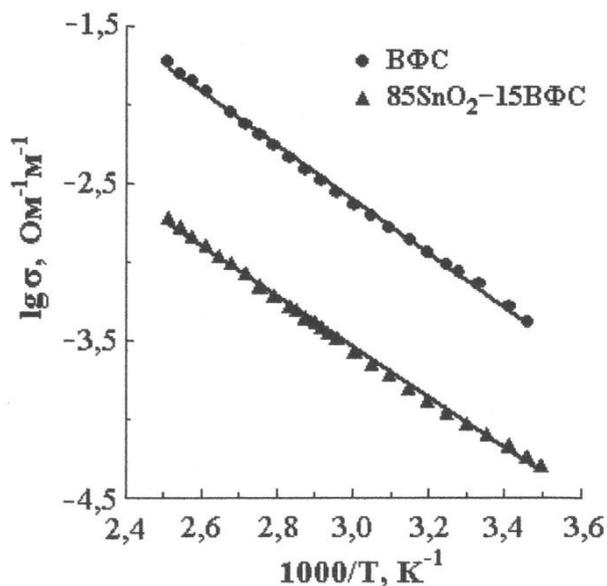


Рисунок 2.8 – Температурні залежності питомої електропровідності склокераміки $85 \text{ SnO}_2\text{--}15 \text{ ВФС}$ і ванадієво-фосфатного скла складу (мол. %) $80 \text{ V}_2\text{O}_5\text{--}20 \text{ P}_2\text{O}_5$

Як зазначалося вище, використання міді у складах кераміки на основі VO_2 і скла системи $\text{V}_2\text{O}_5\text{--P}_2\text{O}_5$ сприяє поліпшенню електричного зв'язку між кристалітами VO_2 .

Тому синтезовані склади кераміки системи $\text{VO}_2\text{-ВФС-Cu-MO}$ містили максимально можливу кількість міді ~ 5 ваг.%, яка зберігалася постійною у всіх складах.

На рис. 2.9 наведено температурні залежності питомої електропровідності для ряду складів кераміки вказаної системи, де, як оксидну добавку MO , використано SnO_2 , TiO_2 і ZnO .

У табл. 2.4 представлено деякі параметри такої склокераміки, знайдені за даними рис. 2.9. Як видно, добавки оксидів впливають на електропровідність склокераміки системи $\text{VO}_2\text{-ВФС-Cu-MO}$.

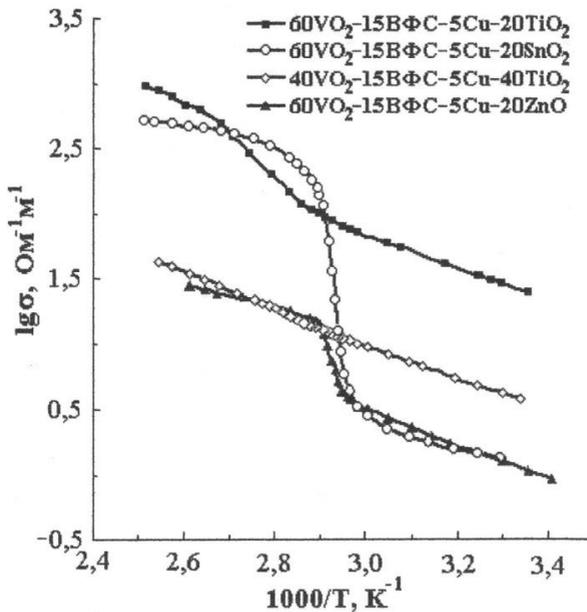


Рисунок 2.9 Температурні залежності питомої електропровідності для ряду складів склокераміки системи $\text{VO}_2\text{-ВФС-Cu-MO}$ з добавками оксидів титану, цинку й олова

Двоокис титану збільшує питому електропровідність кераміки $(80-\beta)\text{VO}_2\text{-15 ВФС-5 Cu-}\beta\text{TiO}_2$ і пригнічує її

стрибок в області фазового переходу метал ізолятор.

У табл. 2.4 представлено деякі параметри такої склокераміки, знайдені за даними рис. 2.9. Як видно, добавки оксидів впливають на електропровідність склокераміки системи $\text{VO}_2\text{-ВФС-Cu-MO}$.

Діоксид титану збільшує питому електропровідність кераміки $(80-\beta)\text{VO}_2\text{-15 ВФС-5 Cu-}\beta\text{TiO}_2$ і пригнічує її стрибок в області фазового переходу метал – ізолятор.

Як видно з даних рис. 2.9 і табл. 2.4, для кераміки $60\text{VO}_2\text{-15 ВФС-5 Cu-20 TiO}_2$ добавка TiO_2 призводить до розширення ФПМІ і зрушення його температури T_{tr} в область вищих значень.

Таблиця 2.4 Параметри ряду складів склокераміки системи $\text{VO}_2\text{-ВФС-Cu-MO}$ з добавками оксидів титану, цинку та олова

Склад кераміки, ваг.%	$T_{tr}, ^\circ\text{C}$	$\Delta E_a, (T < T_{tr}), \text{eV}$	$\Delta E_a, (T > T_{tr}), \text{eV}$	σ_m/σ_s	$S/(l_v)^2$
$60\text{VO}_2\text{-15 ВФС-5 Cu-20 TiO}_2$	89	0,24	0,24	3,8	$2,15 \cdot 10^{-2}$
$60\text{VO}_2\text{-15 ВФС-5 Cu-20 SnO}_2$	69	0,11	0,08	150	$1,14 \cdot 10^{-2}$
$40\text{VO}_2\text{-15 ВФС-5 Cu-40 TiO}_2$	–	0,24	0,24	1,24	–
$60\text{VO}_2\text{-15 ВФС-5 Cu-20 ZnO}$	69	0,25	0,18	3,8	$6,19 \cdot 10^{-4}$

Отримані результати відповідають даним роботи [34], автори якої спостерігали подібну поведінку для плівок системи $\text{VO}_2\text{-TiO}_2$ і встановили, що в цій системі ФПМІ відсутній, коли вміст TiO_2 перевищує 50 об. %.

Дійсно, із даних (рис. 2.9), видна різка зміна електропровідності, яка пов'язана з фазовим переходом метал – ізолятор, відсутня на температурній залежності σ склокераміки $40\text{VO}_2\text{-15 ВФС-5 Cu-40 TiO}_2$ з більшим вмістом діоксиду титану.

У кераміку $60\text{VO}_2\text{-15 ВФС-5 Cu-20 TiO}_2$, що має

невеликий стрибок електропровідності $\sigma_m/\sigma_S \sim 3,8$ в області температури $T_{tr} \sim 89$ °С, енергія активації електропровідності ΔE_a як нижче, так і вище цієї температури, однакова й становить $\sim 0,24$ еВ (табл. 2.4). Це значення збігається з відповідним значенням, отриманим у роботі [34] для матеріалів, синтезованих у системі $\text{TiO}_2\text{-VO}_2$.

Отримані дані дозволяють зробити висновок, що введення діоксиду титану в кераміку на основі VO_2 і ВФС призводить до зменшення вмісту VO_2 . Причиною є утворення твердих розчинів системи $\text{VO}_2\text{-TiO}_2$, що підтверджено даними робіт [35 – 37]. Тверді розчини $\text{TiO}_{1-x}\text{V}_x\text{O}_2$ не мають фазового переходу напівпровідник – метал в області температури $T_{tr} \sim 68$ °С. Тому при досить великому вмісті TiO_2 , коли у кераміці $40 \text{VO}_2\text{-}15 \text{ВФС}\text{-}5 \text{Cu}\text{-}40 \text{TiO}_2$ практично немає діоксиду ванадію, різка зміна електропровідності на температурній залежності σ відсутня (рис. 2.9).

Таким чином, використання оксидної добавки TiO_2 у керамічній системі $\text{VO}_2\text{-ВФС}\text{-Cu}\text{-MO}$ не є бажаним, оскільки вона пригнічує фазовий перехід метал – напівпровідник в області температури $T_{tr} \sim 68$ °С.

Із отриманих даних (рис. 2.9, табл. 2.4), на температурній залежності питомої електропровідності кераміки $60\text{VO}_2\text{-}15 \text{ВФС}\text{-}5 \text{Cu}\text{-}20 \text{ZnO}$ в області температури $T_{tr} \sim 68$ °С бачимо, що має місце досить різка зміна σ , яка викликана ФПМІ у VO_2 . Однак, величина цієї зміни досить мала ($\sigma_m/\sigma_S \sim 3,8$). Енергія активації електропровідності нижче $T_{tr} \sim 0,25$ еВ перевищує відповідне значення для VO_2 , вище температури T_{tr} значення ΔE_a становить $\sim 0,18$ еВ. Як показують результати рентгенофазових досліджень [31], оксид цинку не поводить ся нейтрально при синтезі склокераміки до розплаву ВФС та діоксиду ванадію.

Відповідно відбувається зміна фазового складу склокераміки, викликана взаємодією між цими компонентами. Така взаємодія зменшує вміст кристалічного VO_2 у кераміці, а нові фази, що утворюються при її синтезі,

можуть формувати канал провідності, який буде шунтувати канал провідності по діоксиду ванадію.

Взаємодію між оксидами ZnO, TiO₂ і ВФС при синтезі кераміки складів 85 ZnO–15 ВФС і 85TiO₂–15 ВФС доведено появою нових ліній у рентгенівських спектрах цих склокерамічних матеріалів [31]. Така взаємодія, як можна бачити із даних на рис. 2.10, призводить до істотної зміни електропровідності у порівнянні з електропровідністю чистого, без добавок оксидів, ВФС. На відміну від SnO₂ (рис. 2.8), оксиди ZnO і TiO₂ не зменшують, а збільшують електропровідність склокераміки на основі ВФС.

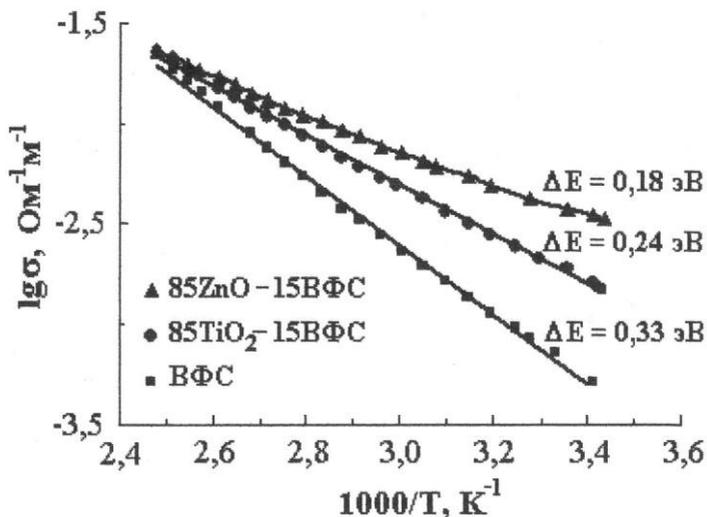


Рисунок 2.10 – Температурні залежності питомої електропровідності ванадієво-фосфатного скла і ряду складів склокераміки на його основі

Якщо у склокераміці 85 SnO₂–15 ВФС енергія активації електропровідності така ж сама, як у ВФС, то у склокераміці 85 ZnO–15 ВФС і 85 TiO₂–15 ВФС вона менша. Найвище збільшення електропровідності та зниження

енергії активації σ спостерігається у склокераміці складу ZnO-ВФС.

Зауважимо, що енергія активації електропровідності кераміки $(80-\beta) \text{VO}_2-15 \text{ВФС}-5 \text{Cu}-\beta \text{TiO}_2$ (табл. 2.4) збігається з ΔE_a кераміки $85\text{TiO}_2-15 \text{ВФС}$, а енергія активації електропровідності $85 \text{ZnO}-15 \text{ВФС}$ збігається з ΔE_a кераміки $60 \text{VO}_2-15 \text{ВФС}-5 \text{Cu}-20 \text{ZnO}$ вище температури T_{tr} .

Таким чином, як і добавка TiO_2 , оксидна добавка ZnO також впливає на електричні властивості кераміки системи $\text{VO}_2\text{-ВФС-Cu-MO}$, пов'язані із ФПМІ у діоксиді ванадію.

З даних рис. 2.9 і табл. 2.4 випливає, що при використанні у системі $\text{VO}_2\text{-ВФС-Cu-MO}$ оксидної добавки SnO_2 стрибок електропровідності в області температури фазового переходу VO_2 перевищує два порядки. Як було показано раніше, це пов'язано з тим, що діоксид олова при синтезі склокераміки поводить ся хімічно нейтрально як до розплаву ВФС, так і до діоксиду ванадію.

Порівняння температурних залежностей електропровідності кераміки в системах $\text{VO}_2\text{-ВФС-SnO}_2$ і $\text{VO}_2\text{-ВФС-Cu-SnO}_2$ (рис. 2.7, рис. 2.9) показує, що добавка міді збільшує електропровідність. Причиною цього є як збільшення електропровідності ВФС за рахунок легування міддю, так і збільшення відносної площі $S/(l_v)^2$ прямого контакту між кристалітами VO_2 (табл. 2.2, табл. 2.3).

Таким чином, із систем сімейства $\text{VO}_2\text{-ВФС-Cu-MO}$ система $\text{VO}_2\text{-ВФС-Cu-SnO}_2$ є найбільш перспективною для створення керамічних матеріалів на основі VO_2 і ванадієво-фосфатного скла, які мають властивості, пов'язані з фазовим переходом метал-ізолятор, і поводять себе стабільно при циклічному нагріванні-охолодженні через температуру переходу T_{tr} . Електропровідність кераміки $(80-\beta) \text{VO}_2-15 \text{ВФС}-5 \text{Cu}-\beta \text{SnO}_2$ системи $\text{VO}_2\text{-ВФС-Cu-SnO}_2$ залежно від вмісту діоксиду олова була досліджена більш докладно.

2.5. Кінетика струму в критичних терморезисторах на основі діоксиду ванадію

Найважливішу роль у функціонуванні критичних терморезисторів відіграє кінетика струму через них при переходах з високоомного стану в низькоомний і зворотно. Слід зауважити, що тривалість переходу з високоомного («off-state») у низькоомний («on-state») стан визначалася у ряді робіт [26, 37 - 40], а даних про тривалість зворотного переходу після проходження імпульсу напруги вкрай мало [41]. У табл. 2.5 наведено значення основних параметрів склокерамічних терморезисторів, які було досліджено.

Таблиця 2.5 Основні електрофізичні параметри досліджуваних критичних терморезисторів на основі діоксиду ванадію

Склад кераміки: А – VO ₂ ; В – ванадієво- фосфатне скло; С – Cu ваг. %	T _{tr} , °C	Енергія активації електропровідності ΔE _a , eV	
		нижче T _{tr}	вище T _{tr}
85А–15В	73	0.32	0.16
84А–15В–1С	73	0.29	0.16
83А–15В–2С	73	0.28	0.12
81А–15В–4С	72	0.20	0.09
80А–15В–5С	72	0.12	0.08
78А–15В–7С	72	0.11	0.054
77А–15В–8С	72	0.059	0.021
75А–15В–10С	–	0.039	–

Дослідження виконувались на установці, схема якої показана на рис. 2.11.

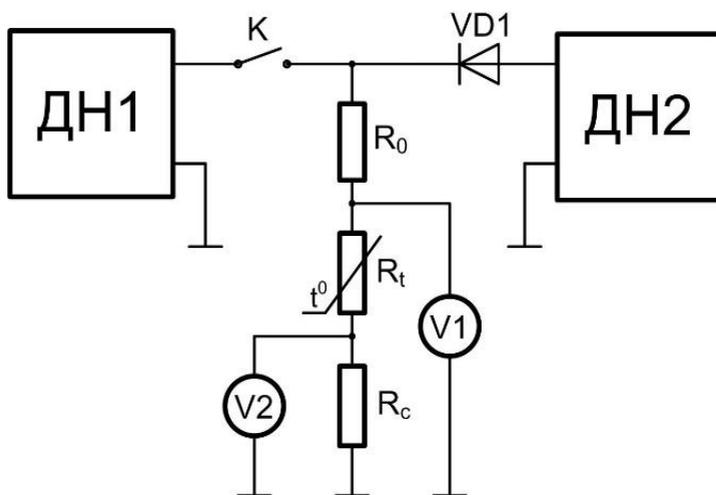


Рисунок 2.11 – Схема установки для дослідження електричного перемикання в критичних терморезисторах на основі діоксиду ванадію

Резистор R_0 з опором 20 Ом обмежував струм через зразок склокераміки R_t після його перемикання в низькоомний стан. Струм через терморезистор визначали за падінням напруги на прецизійному резисторі R_c з опором $0,104 \pm 0,001$ Ом.

Напруги вимірювались з відносною похибкою $\pm 1\%$. В якості джерела постійної напруги ДН1 та ДН2 використовувалися стабілізовані регульовані джерела напруги типу ТЕС 14 НТР 30.5.

Вимірювання виконували за температури 25°C після встановлення термодинамічної рівноваги терморезистора з навколишнім середовищем.

Для перемикання терморезистора з високоомного стану в низькоомний на нього подавалася постійна напруга U_0 з ДН1. Після розмикання ключа K на терморезистор

подавали напругу $U_{0I}=1$ В з ДН2. Така методика давала змогу реєструвати кінетику електричного струму, що протікає через терморезистор, після зняття перемикальної напруги U_0 .

2.5.1. Затримка ввімкнення

На рис. 2.12 б показано типову зміну значення струму, що протікає через терморезистор на основі VO_2 , із часом при подаванні та знятті напруги перемикання U_0 (рис. 2.12 а).

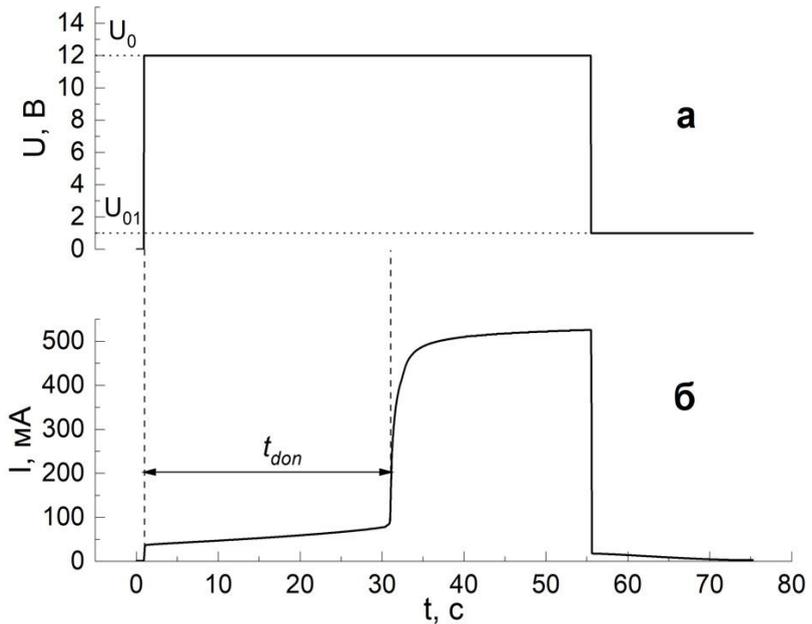


Рисунок 2.12 Кінетика струму через терморезистор на основі VO_2 (б) після подачі та зняття напруги перемикання U_0 (а)

Як видно з даних (рис. 2.12 б), після подачі постійної напруги U_0 , на початку, за рахунок розігріву терморезистора, струм через нього повільно зростає. У цьому інтервалі часу кристаліти VO_2 -склокераміки перебувають у напівпровідниковій фазі, і опір склокераміки змінюється з

температурою так само, як для напівпровідникових терморезисторів з негативним температурним коефіцієнтом опору [42].

Через інтервал часу t_{don} від початку процесу терморезистор нагрівається до температури ФПМІ $T_{tr} \sim 70$ °С і перемикається в стан із низьким електричним опором (on-state). Відбувається різке збільшення електричного струму. У склокераміці формується шнур струму, у межах якого кристаліти VO_2 перебувають у провідній металевій фазі [43]. Через деякий час діаметр шнуру струму досягає рівноважного значення, що визначається термодинамічною рівновагою з навколишнім середовищем. Тому струм I терморезистора перестає змінюватися (рис. 2.12 б).

Таким чином, для розігрівання терморезистора електричним струмом до температури T_{tr} , за якої відбувається перемикання в стан із низьким опором, потрібний деякий час t_{don} . Цей час визначає затримку перемикання критичних терморезисторів і порогових перемикачів на основі матеріалів із фазовим переходом метал – ізолятор. Значення t_{don} можна знайти за часовими залежностями струму (рис. 2.12 б). Для цього треба врахувати, що перемикання починається, коли опір склокераміки досягає величини $R_S = U_{Son}/I_{Son}$, і визначається пороговими значеннями струму I_{Son} і напруги U_{Son} (табл. 2.5). Значення I_{Son} і U_{Son} для досліджених терморезисторів знаходили за пороговою точкою вольт-амперної характеристики, у якій температура терморезистора досягала значення T_{tr} . Для напруги $U = U_d$ (рис. 2.12 б), з якої починається порогове перемикання, з урахуванням схеми (рис. 2.11), нехтуючи малим опором R_c , може бути отримано співвідношення:

$$U_d = U_0 R_S / (R_S + R_0), \quad (2.6)$$

яке в нормалізованому вигляді можна записати як

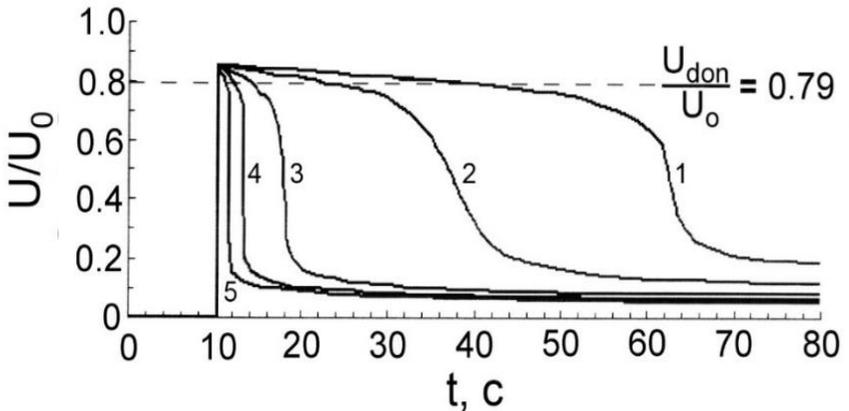
$$U_d / U_0 = I / (1 + R_0 / R_S). \quad (2.7)$$

Співвідношення (2.7) визначає рівень напруги, що дає

зможу знайти час затримки перемикання t_{don} при будь-якому значенні величини U_0 , використовуючи залежності від часу відносного падіння напруги на терморезисторі U_T/U_0 . На рис. 2.13 показано такі часові залежності, зареєстровані за різних значень напруги U_0 .

Рівень падіння напруги на зразку склокераміки на основі діоксиду ванадію, який визначається співвідношенням (2.7), показано на рис. 2.13 пунктирною лінією. Він розрахований для $R_0 = 20$ Ом і значення опору R_s , яке відповідно до параметрів U_{Son} , I_{Son} , представлених у табл. 2.5, дорівнює 84,6 Ом.

На рис. 2.13 абсциси точок перетину пунктирної лінії з кінетичними кривими визначають значення часу затримки перемикання VO₂-терморезистора t_{don} за різних значень напруги U_0 .



Значення U_0 : 1 – 8 В, 2 – 10 В, 3 – 15 В, 4 – 20 В, 5 – 5 В

Рисунок 2.13 Відносне падіння напруги на зразку склокераміки на основі діоксиду ванадію, як функція часу при значеннях U_0

Кінетика відносного падіння напруги U/U_0 для

терморезистора була досліджена за різних значень напруги U_0 для визначення залежності тривалості затримки перемикання t_{don} від напруги.

Зазначена залежність простежується на рис. 2.14, де наведено відносні значення часу затримки перемикання t_d/τ_T , де τ_T позначено теплову сталу часу терморезистора (табл. 2.5).

На рис. 2.14 наведена крива, отримана за експериментальними даними. Як видно, зі зростанням U_0 час затримки монотонно зменшується. Коли падіння напруги на терморезисторі наближається до порогової напруги $U_S \sim 5,5$ В, час затримки різко зростає, прямуючи до нескінченності. Це узгоджується з тим, що за напруги, меншої за U_S , терморезистор не може бути перемкнутим у стан із низьким опором.

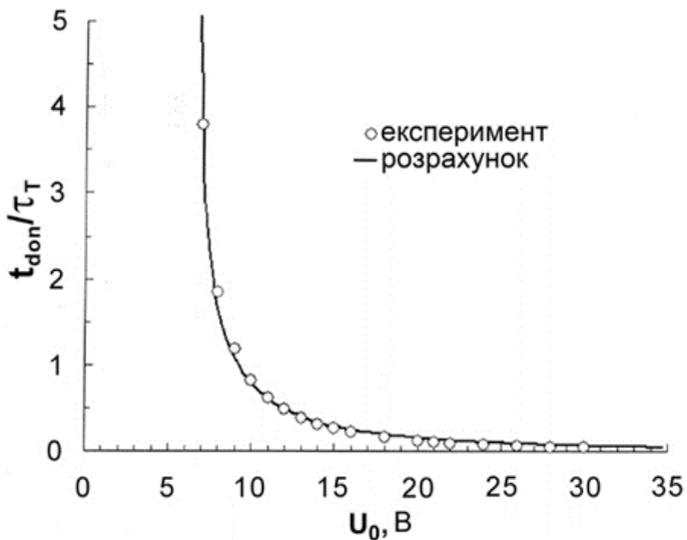


Рисунок 2.14 Експериментальна та розрахункова залежності нормованого часу затримки перемикання терморезистора на основі діоксиду ванадію

Для визначення зв'язку між часом затримки перемикання t_{don} і напругою U_0 можна скористатися моделлю «критичної температури» [1]. Запишемо рівняння теплового балансу терморезистора на основі діоксиду ванадію, увімкненого в коло, як представлено на рис. 2.11:

$$C_T \frac{dT}{dt} + k(T - Q) = \frac{U_0^2 R_T}{(R_0 + R_T)^2}, \quad (2.8)$$

де C_T – теплоємність терморезистора;

T – температура терморезистора;

K – коефіцієнт теплового розсіювання матеріалом терморезистора;

t – час;

Q – температура навколишнього середовища.

Рівняння (2.8) не враховує розподіл температури в об'ємі зразка і навколишньому середовищі. Однак таке наближення досить добре виправдовується на практиці під час аналізу електричних кіл із терморезисторами [42].

Нижче температури ФПМІ T_{tr} залежність опору зразка склокераміки від температури описується відомою формулою:

$$R_T = R_\infty \exp\left(\frac{\Delta E}{k_B T}\right),$$

де ΔE – енергія активації електропровідності;

R_∞ – опір терморезистора при $T \rightarrow \infty$;

k_B – стала Больцмана.

Якщо R_Q – опір терморезистора за температури навколишнього середовища Q , а $\Delta T = T - Q$, то залежність опору терморезистора від температури можна представити у вигляді:

$$R_T = R_Q \exp\left(-\frac{\Delta E \Delta T}{k_S Q(Q + \Delta T)}\right) \quad (2.9)$$

Коефіцієнт теплового розсіювання k , що входить до рівняння (2.8), виразимо через порогову напругу U_{Son} і опір R_S VO_2 -терморезистора з огляду на те, що в пороговій точці вольт-амперної характеристики баланс потужності, що виділяється та розсіюється, у статичному режимі визначається співвідношенням $k(T_{tr} - Q) = U_{Son}^2/R_S$. З цього співвідношення випливає:

$$k = U_{Son}^2/(R_S \Delta T_{tr}), \quad (2.10)$$

де $\Delta T_{tr} = (T_{tr} - Q)$.

Час затримки перемикання терморезистора t_{don} визначається часом, необхідним для його розігріву від температури довкілля Q до деякої «критичної температури», за якої відбувається перемикання терморезистора в стан «on-state». Такою «критичною температурою» є температура фазового переходу метал – ізолятор T_{tr} в діоксиді ванадію. Тому, виконавши інтегрування (2.8) в інтервалі $0 \leq \Delta T \leq \Delta T_{tr}$, з урахуванням співвідношень (2.10) та $T = Q + \Delta T$, для відносної величини часу затримки перемикання t_d/τ_T отримаємо вираз:

$$\frac{t_{don}}{\tau_T} = \int_0^{\Delta T_{tr}} \frac{d\Delta T}{\left(\frac{U_0}{U_S}\right)^2 \frac{R_T R_S \Delta T_{tr}}{(R_0 + R_T)^2} - \Delta T} \quad (2.11)$$

де тепла постійна часу склокераміки дорівнює $\tau_T = C_T/k$ [44].

Вираз (2.11) визначає зв'язок між відносним часом

затримки перемикання терморезистора на основі VO_2 і постійною напругою U_0 , прикладеною до нього у момент часу, починаючи з якого відраховується час затримки.

Результати розрахунку для дослідженого критичного терморезистора (параметри в табл. 2.5), виконані в діапазоні напруги $7 \text{ В} \leq U_0 \leq 35 \text{ В}$ з інтервалом $0,1 \text{ В}$ при $Q = 25^\circ\text{C}$, $R_0 = 20 \text{ Ом}$ і кроком інтегрування $0,01$ град, представлені на рис. 2.14. Ці результати дають змогу знайти напругу $U_0 = 9 \text{ В}$, за якої час затримки перемикання терморезистора збігається з його тепловою постійною часу τ_T ($t_{don}/\tau_T = 1$).

За часовою залежністю відносного падіння напруги на терморезисторі, зареєстрованою за $U_0 = 9 \text{ В}$, знайдено значення теплової постійної часу $\tau_T = 40 \text{ с}$, до якої нормовано експериментальні значення t_{don} , представлені кружками на рис. 2.14. Як видно, має місце хороша відповідність між результатами розрахунку й експерименту, що підтверджує застосованість моделі «критичної температури» для опису кінетики перемикання критичних терморезисторів на основі VO_2 .

2.5.2 Кінетика вимкнення

З отриманих даних (рис. 2.12) видно що протягом деякого часу після зняття напруги U_0 , яка викликала перемикання терморезистора, і подачі на зразок малої опорної напруги U_{01} спостерігається спад струму. Така поведінка свідчить, що струм з кристалітами VO_2 у металевій фазі зберігається протягом деякого часу після вимкнення напруги U_0 . Отже, має місце затримка вимкнення t_{doff} зразків VO_2 -склокераміки, яка пов'язана з переходом зі стану з малим опором («on-state») у стан з великим опором («off-state»).

На графіку (рис. 2.15) показано часові залежності струму через зразок VO_2 -склокераміки, зареєстровані за різних значень напруги перемикання U_0 , починаючи з моменту її зняття (початковий момент часу відповідає задньому фронту прямокутного імпульсу (рис. 2.12 а).

Зменшення струму зразка з часом пов'язане з його охолодженням від температури в момент вимкнення напруги

U_0 до температури навколишнього середовища Q . На початковій стадії у зразка існує канал струму з кристалітами VO_2 в провідній металевій фазі. За досить великих напруг U_0 , коли канал струму має досить великий поперечний переріз, зразок склокераміки має малий опір R_f . Тому, оскільки $R_f \ll R_0$, його струм у схемі (рис. 2.11) повністю контролює обмежувальний резистор R_0 . Це пояснює наявність ділянки зі слабкою залежністю струму від часу на початковій стадії кінетичного процесу (рис. 2.15, region 1).

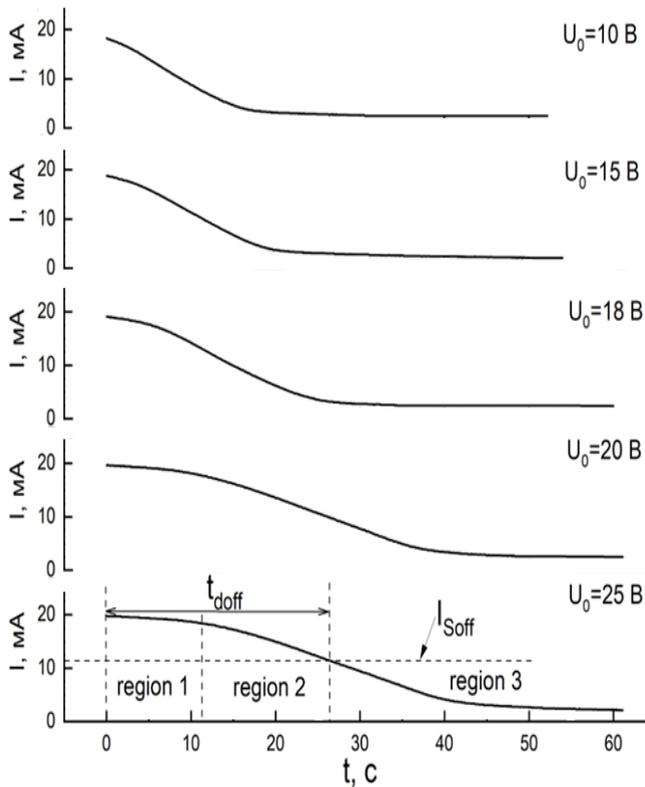


Рисунок 2.15 – Кінетика струму під час переходу VO_2 -терморезистора зі стану з низьким опором у стан з високим опором за різних величин напруги перемикавання

Як видно з графіка (рис. 2.15), довжина цієї ділянки збільшується зі зростанням напруги U_0 . Причиною цього є те, що при збільшенні U_0 канал струму розширюється в поперечному напрямку. Що веде до збільшення кількості кристалітів VO_2 у металевій фазі. Тому потрібний більший час для розсіювання теплоти ФПМІ, яка виділяється під час переходу кристалітів VO_2 з металевої фази у напівпровідникову.

У процесі переходу кристалітів VO_2 з металевої фази в напівпровідникову поперечні розміри каналу струму зменшуються, що веде до збільшення опору VO_2 склокераміки. Це є причиною зменшення струму з часом (рис. 2.15, region 2).

Тому за струмів, менших за I_{soff} , у VO_2 -склокераміці канал струму відсутній, і подальше зменшення струму зумовлене зменшенням температури зразка, в якому всі кристаліти VO_2 перебувають у напівпровідниковій фазі (рис. 2.15, region 3).

Таким чином, час t_{doff} , що визначає затримку перемикання критичних терморезисторів на основі VO_2 з «on-state» в «off-state», можна знайти з даних графіку (рис. 2.15), використовуючи рівень струму $I_{\text{soff}} = 11 \text{ mA}$ (табл. 2.5).

На рис. 2.16 представлено залежність часу затримки перемикання VO_2 -терморезисторів з «on-state» в «off-state» від величини напруги перемикання U_0 .

Час затримки t_{doff} , на відміну від часу затримки t_{don} (рис. 2.12), зростає при збільшенні напруги U_0 .

Таким чином, має місце протилежний характер залежностей від напруги U_0 часу затримки перемикання зразків VO_2 -терморезисторів зі стану з високим опором у стан з низьким опором і навпаки.

Слід зауважити, що після зняття напруги U_0 струм через терморезистор практично моментально падає більш ніж на порядок (рис. 2.12 б), а після цього протікають релаксаційні процеси, описані вище.

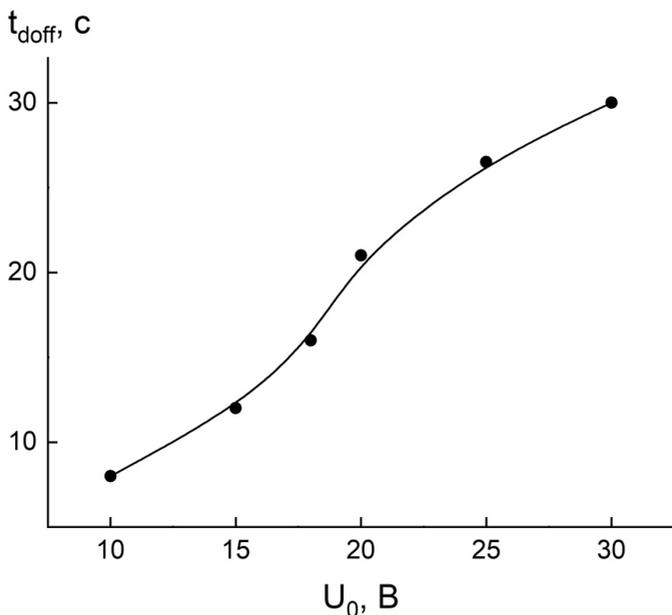


Рисунок 2.16 Залежність часу затримки t_{doff} зразків VO_2 -терморезистора від напруги перемикавання U_0

Тому кінетика перемикавання терморезистора на основі діоксиду ванадію в «off-state» стан значно менше впливає на її практичне застосування, ніж кінетика перемикавання в on-state стан.

Перелік використаних літературних джерел до розділу 2

1. Terukow, J. I., Tschudnowski, F. A., Wolf, E., Brückner, W., Oppermann, H., & Reichelt, W. (1983). Vanadiumoxide: Darstellung, Eigenschaften, Anwendung. <https://doi.org/10.1515/9783112545423>

2. Eyert, V. (2002). The metal-insulator transitions of VO_2 : A band theoretical approach. *Annalen der Physik*, 514(9), 650–704.

<https://doi.org/10.1002/andp.20025140902>

3. Ladd, L. A., & Paul, W. (1969). Optical and transport properties of high quality crystals of V₂O₄ near the metallic transition temperature. *Solid State Communications*, 7(4), 425–428.

[https://doi.org/10.1016/0038-1098\(69\)90888-6](https://doi.org/10.1016/0038-1098(69)90888-6)

4. Rozgonyi, G. A., & Hensler, D. H. (1968). Structural and electrical properties of vanadium dioxide thin films. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 5(6), 194–199.

<https://doi.org/10.1116/1.1492608>

5. Remke, R. L., Walser, R. M., & Bene, R. W. (1982). The effect of interfaces on electronic switching in VO₂ thin films. *Thin Solid Films*, 97(2), 129–143.

[https://doi.org/10.1016/0040-6090\(82\)90222-X](https://doi.org/10.1016/0040-6090(82)90222-X)

6. McWhan, D. B., Marezio, M., Remeika, J. P., & Dernier, P. D. (1974). X-ray diffraction study of metallic V O₂. *Physical review B*, 10(2), 490.

[https://DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.10.490](https://DOI:https://doi.org/10.1103/PhysRevB.10.490)

7. Hearn C. J. Phonon softening and the metal-insulator transition in VO₂ / C. J. Hearn // J. Phys. C: Solid State Phys. – 1972. – V. 5. – P. 1317–1334.

8. Haras, A., Witko, M., Salahub, D. R., Hermann, K., & Tokarz, R. (2001). Electronic properties of the VO₂ (0 1 1) surface: density functional cluster calculations. *Surface science*, 491(1-2), 77–87.

[https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(01\)01336-X](https://doi.org/10.1016/S0039-6028(01)01336-X)

9. Ilinskiy, A. V., Kvashenkina, O. E., & Shadrin, E. B. (2012). Phase transition and correlation effects in vanadium dioxide. *Semiconductors*, 46, 422–429.

<https://link.springer.com/article/10.1134/S1063782612040094>

10. Petrov, G. I., Yakovlev, V. V., & Squier, J. (2002). Raman microscopy analysis of phase transformation mechanisms in vanadium dioxide. *Applied physics letters*, 81(6), 1023-1025.

<https://doi.org/10.1063/1.1496506>

11. Okazaki, K., Fujimori, A., & Onoda, M. (2002). Temperature-dependent electronic structure of VO₂ in the insulating phase. *Journal of the Physical Society of Japan*, 71(3), 822–825.

- <https://journals.jps.jp/doi/10.1143/JPSJ.71.822?mobileUi=0>
12. Cavalleri, A., Dekorsy, T., Chong, H. H., Kieffer, J. C., & Schoenlein, R. W. (2004). Evidence for a structurally-driven insulator-to-metal transition in VO₂: A view from the ultrafast timescale. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 70(16), 161102.
[https://DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.70.161102](https://DOI:https://doi.org/10.1103/PhysRevB.70.161102)
13. Tanaka, A. (2003). A new scenario on the metal–insulator transition in VO₂. *Journal of the Physical Society of Japan*, 72(10), 2433–2436.
<https://doi.org/10.1143/JPSJ.72.2433>
14. Tanaka, A. (2004). On the metal–insulator transitions in VO₂ and Ti₂O₃ from a unified viewpoint. *Journal of the Physical Society of Japan*, 73(1), 152–162.
<https://doi.org/10.1143/jpsj.73.152>
15. Biermann, S., Poteryaev, A., Lichtenstein, A. I., & Georges, A. (2005). Dynamical singlets and correlation-assisted Peierls transition in VO₂. *Physical review letters*, 94(2), 026404.
[https://DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.94.026404](https://DOI:https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.94.026404)
16. Ladd, L. A., & Paul, W. (1969). Optical and transport properties of high quality crystals of V₂O₄ near the metallic transition temperature. *Solid State Communications*, 7(4), 425–428.
[https://doi.org/10.1016/0038-1098\(69\)90888-6](https://doi.org/10.1016/0038-1098(69)90888-6)
17. Borek, M., Qian, F., Nagabushnam, V., & Singh, R. K. (1993). Pulsed laser deposition of oriented VO₂ thin films on R-cut sapphire substrates. *Applied physics letters*, 63(24), 3288–3290.
<https://doi.org/10.1063/1.110177>
18. Gentle, A., Maarroof, A. I., & Smith, G. B. (2006). Nanograin VO₂ in the metal phase: a plasmonic system with falling dc resistivity as temperature rises. *Nanotechnology*, 18(2), 025202.
[https://DOI 10.1088/0957-4484/18/2/025202](https://DOI10.1088/0957-4484/18/2/025202)
19. Wu, X., Tao, Y., Dong, L., Wang, Z., & Hu, Z. (2005). Preparation of VO₂ nanowires and their electric

- characterization. *Materials Research Bulletin*, 40(2), 315–321.
<https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2004.10.013>
20. Futaki, H. (1965). A new type semiconductor (critical temperature resistor). *Japanese Journal of Applied Physics*, 4(1), 28.
<https://DOI.10.1143/JJAP.4.28>
21. Umar, Z. A., Ahmed, R., Asghar, H., Liaqat, U., Fayyaz, A., & Baig, M. A. (2022). VO₂ thin film based highly responsive and fast VIS/IR photodetector. *Materials Chemistry and Physics*, 290, 126655.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126655>
22. Zhang, H., Wu, Z., Wang, C., & Sun, Y. (2019). VO₂ film with small hysteresis width and low transition temperature. *Vacuum*, 170, 108971.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.108971>
23. Pergament, A., Stefanovich, G., Malinenko, V., & Velichko, A. (2015). Electrical switching in thin film structures based on transition metal oxides. *Advances in Condensed Matter Physics*, 2015(1), 654840.
<https://doi.org/10.1155/2015/654840>
24. Li, D., Sharma, A. A., Gala, D. K., Shukla, N., Paik, H., Datta, S., ... & Skowronski, M. (2016). Joule heating-induced metal–insulator transition in epitaxial VO₂/TiO₂ devices. *ACS applied materials & interfaces*, 8(20), 12908–12914.
[https://DOI: 10.1021/acsami.6b03501](https://DOI:10.1021/acsami.6b03501)
25. Kolbunov, V. R., Ivon, A. I., & Chernenko, I. M. (2003). Influence of a high conductivity additive on the electrical properties of vanadium dioxide-based ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 23(9), 1435–1439.
[https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(02\)00347-3](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(02)00347-3)
26. Kusano, E., Theil, J. A., & Thornton, J. A. (1988). Deposition of vanadium oxide films by direct-current magnetron reactive sputtering. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 6(3), 1663–1667.
<https://doi.org/10.1116/1.575304>

27. Murawski, L., Chung, C. H., & Mackenzie, J. D. (1979). Electrical properties of semiconducting oxide glasses. *Journal of non-crystalline solids*, 32(1-3), 91–104.
[https://doi.org/10.1016/0022-3093\(79\)90066-8](https://doi.org/10.1016/0022-3093(79)90066-8)
28. Tsuchiya, T., Otonari, M., & Ariyama, T. (1987). Internal friction and electrical properties in phosphate glasses containing transition metal oxides. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 95, 1001–1008.
[https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(87\)80709-3](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(87)80709-3)
29. Mott, N. F., & Davis, E. A. (2012). *Electronic processes in non-crystalline materials*. OUP Oxford.
<https://global.oup.com/academic/product/electronic-processes-in-non-crystalline-materials-9780199645336?cc=pl&lang=en&>
30. Kirkpatrick, S. (1973). Percolation and conduction. *Reviews of modern physics*, 45(4), 574.
[https://DOI: https://doi.org/10.1103/RevModPhys.45.574](https://DOI:https://doi.org/10.1103/RevModPhys.45.574)
31. Kolbunov, V. R., Ivon, A. I., Kunitskiy, Y. A., & Chernenko, I. M. (2013). The influence of microstructure and phase composition of glass ceramics in the VO₂–V₂O₅–P₂O₅–Cu₂O–SnO₂ system on the electrical properties related to the metal–semiconductor phase transition. *Ceramics International*, 39(4), 3613–3620.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.10.189>
32. Lee, M. H., Kim, M. G., & Song, H. K. (1996). Thermochromism of rapid thermal annealed VO₂ and Sn-doped VO₂ thin films. *Thin Solid Films*, 290, 30–33.
[https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(96\)09201-2](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(96)09201-2)
33. Balberg, I., Abeles, B., & Arie, Y. (1974). Phase transition in reactively co-sputtered films of VO₂ □ TiO₂. *Thin Solid Films*, 24(2), 307–310.
[https://doi.org/10.1016/0040-6090\(74\)90175-8](https://doi.org/10.1016/0040-6090(74)90175-8)
34. Kristensen, I. K. (1974). Seebeck coefficient and electrical conductivity in the system TiO₂ □ VO₂. *Materials Research Bulletin*, 9(12), 1677–1680.
[https://doi.org/10.1016/0025-5408\(74\)90161-5](https://doi.org/10.1016/0025-5408(74)90161-5)

35. Zhao, G., Kozuka, H., Lin, H., & Yoko, T. (1999). Sol-gel preparation of Ti_{1-x}V_xO₂ solid solution film electrodes with conspicuous photoresponse in the visible region. *Thin Solid Films*, 339(1-2), 123–128.

[https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(98\)01227-9](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(98)01227-9)

36. Zhao, G., Kozuka, H., Lin, H., Takahashi, M., & Yoko, T. (1999). Preparation and photoelectrochemical properties of Ti_{1-x}V_xO₂ solid solution thin film photoelectrodes with gradient bandgap. *Thin Solid Films*, 340(1-2), 125–131.

[https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(98\)01362-5](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(98)01362-5)

37. Alemany, L. J., Bañares, M. A., Larrubia, M. A., Jiménez, M. C., Delgado, F., & Blasco, J. M. (1996). Vanadia-titania systems: morphological and structural properties. *Materials research bulletin*, 31(5), 513–520.

[https://doi.org/10.1016/S0025-5408\(96\)00029-3](https://doi.org/10.1016/S0025-5408(96)00029-3)

38. Liao, G. M., Chen, S., Fan, L. L., Chen, Y. L., Wang, X. Q., Ren, H., ... & Zou, C. W. (2016). Dynamically tracking the joule heating effect on the voltage induced metal-insulator transition in VO₂ crystal film. *AIP Advances*, 6(4).

<https://doi.org/10.1063/1.4948311>

39. Rana, A., Li, C., Koster, G., & Hilgenkamp, H. (2020). Resistive switching studies in VO₂ thin films. *Scientific reports*, 10(1), 3293.

<https://www.nature.com/articles/s41598-020-60373-z>

40. Walls, B., Murtagh, O., Bozhko, S. I., Ionov, A., Mazilkin, A. A., Mullarkey, D., ... & Shvets, I. V. (2022). VO_x Phase Mixture of Reduced Single Crystalline V₂O₅: VO₂ Resistive Switching. *Materials*, 15(21), 7652.

<https://www.mdpi.com/1996-1944/15/21/7652>

41. Radu, I. P., Govoreanu, B., Mertens, S., Shi, X., Cantoro, M., Schaekers, M., ... & Martens, K. (2015). Switching mechanism in two-terminal vanadium dioxide devices. *Nanotechnology*, 26(16), 165202.

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-4484/26/16/165202/meta>

42 Fraden, J. (2016). *Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications* Fifth Edition. Springer, Switzerland.

<https://rizkia.staff.telkomuniversity.ac.id/files/2017/11/Handbook-of-modern-sensors-physics-designs-and-applications-Fraden-Jacob-Springer-2016.pdf>

43. Ivon, A. I., Chernenko, I. M., Kolbunov, V. R., & Mozharovsky, L. A. (2007). The size effect in current–voltage characteristic of VO₂-based ceramics in the on-state. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 18, 1009–1012.

<https://doi.org/10.1007/s10854-006-9106-3>

Розділ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОРЕЗИСТОРІВ НА ОСНОВІ ДІОКСИДУ ВАНАДІЮ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ ЕЛЕКТРОТЕПЛОВИХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ У ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ КОМПОНЕНТАХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

Найпоширенішим технічним рішенням проблем запобігання погіршення надійності фотоелектричних компонентів сонячних батарей від виникнення перегрівів, пов'язаних із електричними навантаженнями, є включення додаткових елементів – байпасних діодів. Однак, як відомо, практика встановлення паралельно ланцюжку сонячних елементів таких діодів показала, що «гарячі плями» все ж таки виникають.

Байпасні діоди найбільш ефективні для запобігання виникнення «гарячих плям» при коротких послідовностях фотоелектричних елементів, але такі конструкції не застосовуються у сучасних панелях з економічних міркувань.

З іншого боку, вони, як і інші раніше згадані схемотехнічні рішення, реагують в основному на електричні перевантаження (як правило, на перенапругу). Підвищення температури не є для них вхідним контрольованим параметром і призводить до наслідків аналогічних перегріву елементів, що захищаються. З цієї точки зору, є актуальною розробка елементів захисту, які реагують безпосередньо на підвищення температури.

Одним із напрямків рішення такого завдання є використання терморезисторів на основі матеріалів з ФПМІ, яке розглянуто теоретично в [1] та досліджувалось експериментально в [2, 3]. Ці твердотільні елементи мають стрибкоподібну зростаючу залежність електричної провідності при досягненні відповідної температури фазового переходу T_t . Конструктивно тепловий захист реалізується шляхом доповнення окремого

фотоелектричного елемента терморезисторним елементом захисту, який знаходиться з ним у тепловому контакті. При їх паралельному підключенні і нагріванні елементом, що захищається, останній може бути «закорочений» терморезистором внаслідок переходу його 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 відомості про їхнє використання у сонячних батареях у літературі не наводяться. У зв'язку з цим, актуальним є експериментальне дослідження і обґрунтування можливостей та перспектив використання критичних терморезисторів на основі діоксиду ванадію для запобігання перегріву у колах фотоелектричних систем сонячних батарей.

3.1. Технічні характеристики терморезисторів, які застосовувалися в дослідженнях

При проведенні досліджень у якості терморезисторного елемента використовувалися склокерамічні матеріали на основі діоксиду ванадію і ванадієво-фосфатного скла. Як і монокристалічний діоксид ванадію ці елементи зазнають ФПМІ, який ініційовано зміною температури і супроводжується різкою зміною теплофізичних, електричних та магнітних властивостей. Температура фазового переходу становить $T_t \approx 68^\circ\text{C}$. За температур нижче T_t склокерамічні матеріали, що розглядаються, є напівпровідниковими матеріалами. Вище T_t їхні електричні властивості відповідають металевій фазі. Зміна електроопору склокераміки на основі VO_2 при ФПМІ досягає декількох порядків.

На рис. 3.1 наведено температурну залежність опору зразка склокераміки на основі діоксиду ванадію. При отриманні цієї залежності швидкість зростання температури не перевищувала $1^\circ\text{C}/\text{хв}$, а похибка виміру температури

була не більшою за $\pm 0,5$ °C.

Електронні пристрої на основі таких матеріалів можуть працювати при великих величинах електричного струму (до 10 А). Це дозволяє створювати елементи, відомі як порогові перемикачі та критичні терморезистори.

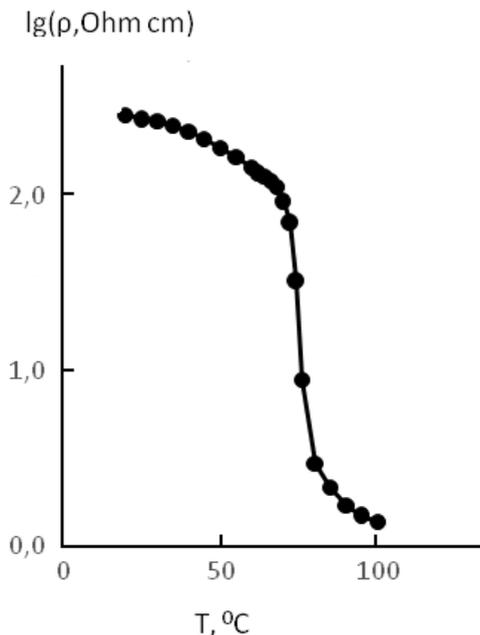


Рисунок 3.1 – Типова температурна залежність електричного опору зразка склокераміки на основі діоксиду ванадію

Критичні терморезистори, що поєднують властивості теплового реле і терморезистора з негативним температурним коефіцієнтом опору можуть зокрема, використовуватися для ефективного захисту від перегрівів пристроїв електронної техніки [4, 5].

На рис. 3.2 наведено вольт-амперну характеристику цього зразка.

На графіку можна побачити іншу особливість цих матеріалів – наявність гістерезису. Перемикання зразка з низькопровідного стану у високопровідний відбувається при більшій напрузі, чим зворотне перемикання.

Зразок склокераміки на основі діоксиду ванадію, який використовувався у цій роботі у якості критичного терморезистора, мав опір за кімнатної температури біля 70 Ом, а після перемикання у високопровідний стан – біля 0,5 Ом

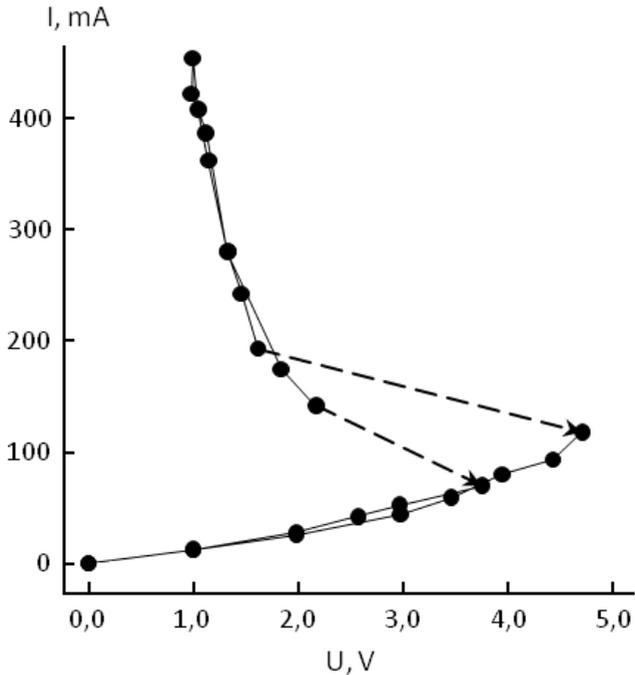


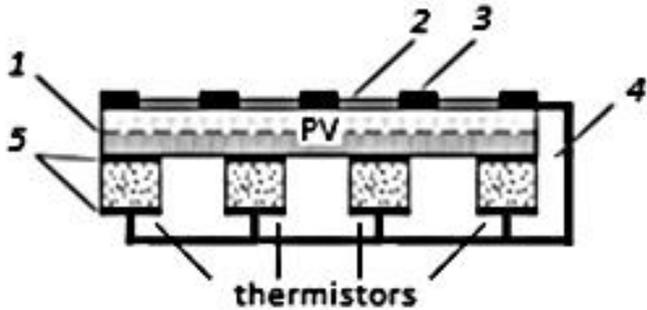
Рисунок 3.2 – Типова вольт-амперна характеристика зразка склокераміки на основі діоксиду ванадію (стрілки вказують напрямок зміни напруги)

3.2. Вплив підвищених температур на вольт-амперні характеристики фотоелектричного модуля з підключеним терморезистором

3.2.1. Методика дослідження ефективності застосування критичних терморезисторів

Реалізація термісторного захисту від перегріву фотоелектричних елементів (ФЕ) сонячних батарей являла собою двошарову структуру з підключених паралельно ФЕ і

терморезистора на основі склокераміки діоксиду ванадію з ФПМІ, які знаходяться в тепловому контакті. Її конструкція зображена на рис. 3.3, схема структури, що досліджувалася – на рис. 3.4.



- 1 – *p-n* перехід фотоелектричного елемента;
- 2, 3 – просвітлююче покриття та металева сітка (електрод) фотоелектричного елемента;
- 4 – шар ізолятора;
- 5 – електропровідні шари.

Рисунок 3.3 – Схематичне зображення структури, що досліджувалася

У дослідженнях використовувалися зразки ФЕ із полікристалічного кремнію з розмірами 150x50 мм.

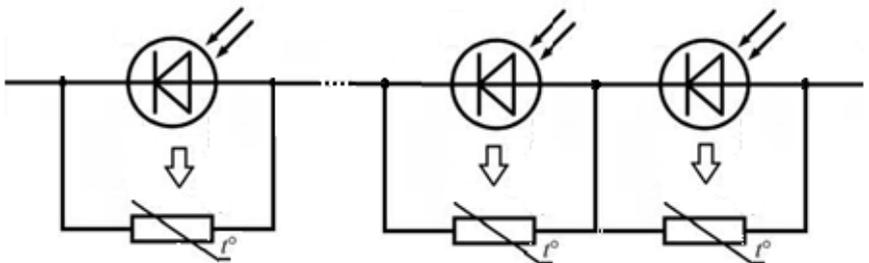


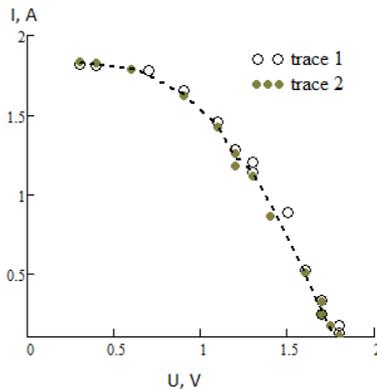
Рисунок 3.4 – Еквівалентна електрична схема ФЕ модуля, що досліджувався, з захистом від перегрівів

Для вимірювання вольт-амперної характеристики $I(U)$ та кривої потужності $P(U)$ використовувалася відома вимірювальна схема вольтметра-амперметра [6, 7].

В якості електричного навантаження використано змінний резистор. Роль джерела світла виконував імітатор сонячного випромінювання, який моделював умови АМ1,5. Для досліджень за підвищеної температури модель сонячної батареї поміщалася у розігрітий термостат, а після кожного такого вимірювання охолоджувалась до кімнатної температури у вільному режимі.

3.2.2. Вплив терморезистора на фотоелектричні характеристики моделі сонячного модуля

На графіку (рис. 3.5) наведено характеристики моделі сонячної батареї, яка складається з чотирьох послідовно включених зразків ФЕ, при використанні в якості теплового захисту терморезисторних байпасних елементів і без них.



- 1 – модель сонячного модуля без терморезисторного елемента;
- 2 – модель сонячного модуля з терморезисторним елементом.

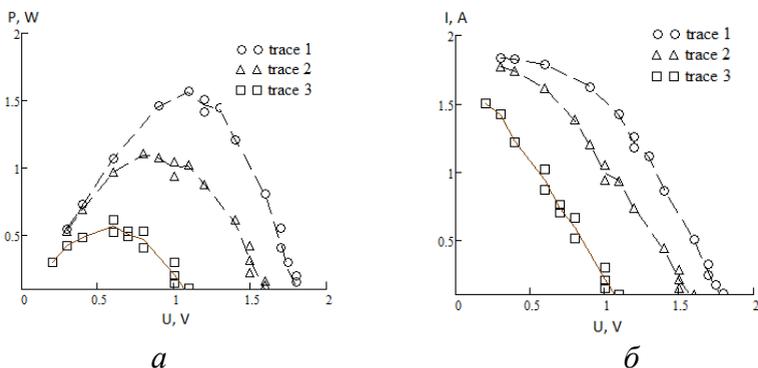
Рисунок 3.5 – Вольт-амперні характеристики моделі фотоелектричного модуля у стандартних умовах

При кімнатній температурі (T_K) вимірювалися вольт-амперні характеристики $I(U)$ та криві потужності $P(U)$ і моделі без та з підключенням терморезисторних байпасних

елементів, які при T_K знаходяться у низькопровідному (ізолюючому) стані.

Як видно з графіку (рис. 3.5) (криві 1, 2) наявність терморезисторних байпасних елементів у електричній схемі моделі сонячної батареї не впливає на її фотоелектричні характеристики у разі справності всіх її ФЕ.

На рис. 3.6 представлені характеристики моделі сонячної батареї без та за наявності відмови, тобто коли одне із кіл «ФЕ-терморезистор» має температуру вищу за точку переходу терморезистора у високопровідний (металевий) стан.



1-фотоелектричний модуль без байпасних терморезисторів;
2, 3-фотоелектричний модуль з байпасними терморезисторами

Рисунок 3.6 – Вольт-амперні характеристики (а) та криві потужності (б) моделі фотоелектричного модуля при наявності пошкодженого фотоелектричного елемента с високим опором

На практиці такий стан може досягатися і за рахунок збільшення температури зазначеного кола, і за рахунок підігріву його електричним струмом. Як бачимо, така відмова (перегрів) окремих елементів призводить до тих

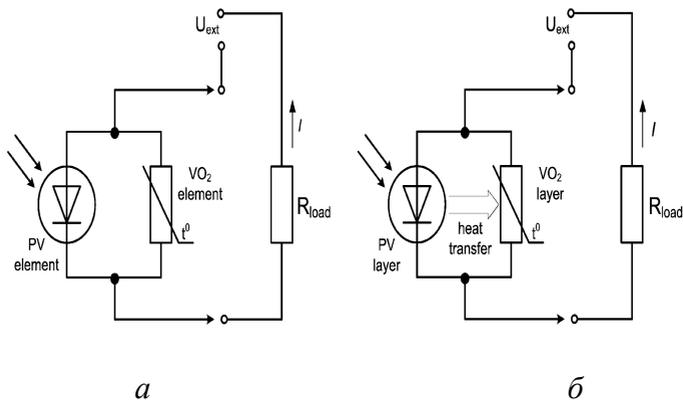
самих результатів, що і при використанні механічного закорочування (викидання відповідного елемента або елементів із послідовного ланцюга). Результат той же – зниження напруги, що генерується, і потужності.

3.3. Вплив електричної перенапруги та підвищених температур на електричні характеристики окремого фотоелектричного елемента

3.3.1. Методика досліджень

У нижчеописаних дослідженнях використовувалися зразки фотоелектричними елементами із полікристалічного кремнію з розмірами 150 x 50 мм.

Досліджувалась кінетика залежності струму $I(t)$ через опори навантаження R_{load} , падіння напруги $U(t)$ та температур фотоелектричного $T_1(t)$ і терморезисторного $T_2(t)$ елементів (рис. 3.7 а) або комбінованої структури (рис. 3.7 б) на їх основі, при включенні перепаду постійної напруги від $U_{min} = 0$ до $U_{max} = 5-15$ V. Використовувалася вимірвальна схема (рис. 3.7).



а – схема з окремим терморезистором, ізольованим від фотоелемента,
б – фотоелектричний і терморезистивний шари в тепловому контакті.

Рисунок 3.7 – Електрична схема дослідження кінетики протікання струму у фотоелектричному елементі з байпасним терморезисторним елементом

Роль навантаження виконував резистор R_{load} . Відлік часу при вимірі релаксаційних залежностей проводився за секундоміром.

Напруга, яка у реальних випадках створюється у фотоелектричному модулі (послідовного з'єднання активних ФЕ) і прикладається до (неактивного, затіненого) фотоелементу з високим опором, імітувалася джерелом постійної напруги E .

Вимірювання температури проводилося термопарами. У цьому виникали деякі проблеми, пов'язані з її градієнтом уздовж зразків як ФЕ, так і терморезисторного елемента (товщина 1,5 мм, діаметр 10 мм), і навіть впливом формування каналів високої провідності при ФПМІ в останньому [8, 9]. У результаті термопари давали показання деякої середньої, як правило, заниженої температури. У зв'язку з цим, для терморезисторного елемента температура обчислювалася за значенням його опору з використанням залежності, зображеної на рис. 3.1.

3.3.2. Вплив байпасного терморезистора на електричні характеристики ФЕ з високим опором

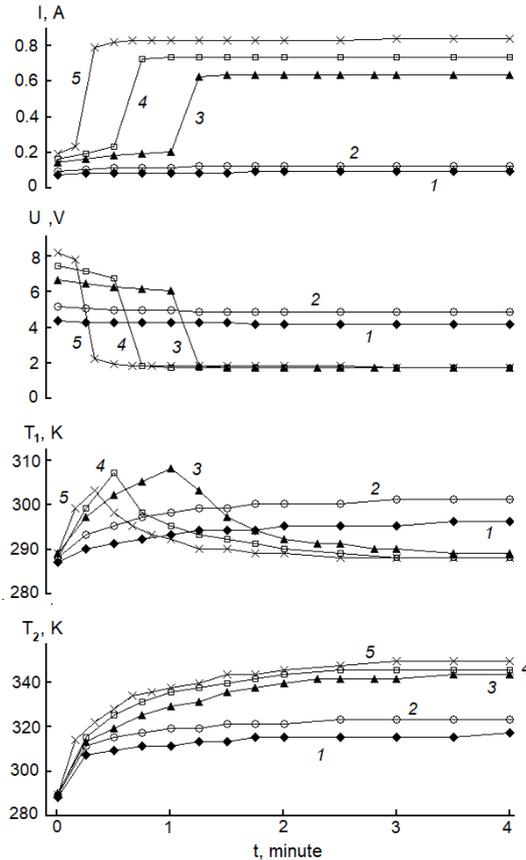
Кінетичні залежності струму через опір навантаження I і напруги U на паралельному з'єднанні зворотно-зміщеного ФЕ та теплоізольованого від нього VO_2 -терморезистора, і відповідні залежності їх температур T_1 і T_2 показані на рис. 3.8.

Як видно, кінетичні залежності температур $T_{1,2}(t)$ і струму $I(t)$ структури різко зростають на початкових ділянках, що корелює зі спостереженнями для зворотно-зміщених ФЕ у передпробійному режимі [10].

Цьому відповідає зростання потужності розсіювання як для ФЕ, так і 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 та послідовно включеним з ним опором навантаження R_{load} (рис. 3.7).

У процесі релаксації температура байпасного

терморезистора збільшується до відповідних значень температури ФПНІ, а температура ФЕ спочатку зростає, а потім зменшується.



- 1 – значення напруги джерела живлення 5 В;
- 2 – значення напруги джерела живлення 6 В;
- 3 – значення напруги джерела живлення 8 В;
- 4 – значення напруги джерела живлення 9 В;
- 5 – значення напруги джерела живлення 10 В;

Рисунок 3.8 – Залежність струму через опір навантаження (I), падіння напруги на ФЕ (U) і температур ФЕ (T_1) і терморезистора (T_2) від часу при різних значеннях напруги джерела живлення E для конструкції ФЕ-терморезистор без теплового контакту

У результаті досягається стабільний стан з постійними значеннями струму I_{st} , падіння напруги U_{st} , температур T_{st} ФЕ та терморезистора (рис. 3.8). При цьому падіння напруги і збільшення температури незначні. Таким чином реалізується його тепловий та електричний захист.

Залежність усталених значень характеристик, що досліджувались, від напруги джерела живлення E представлена на рис. 3.9.

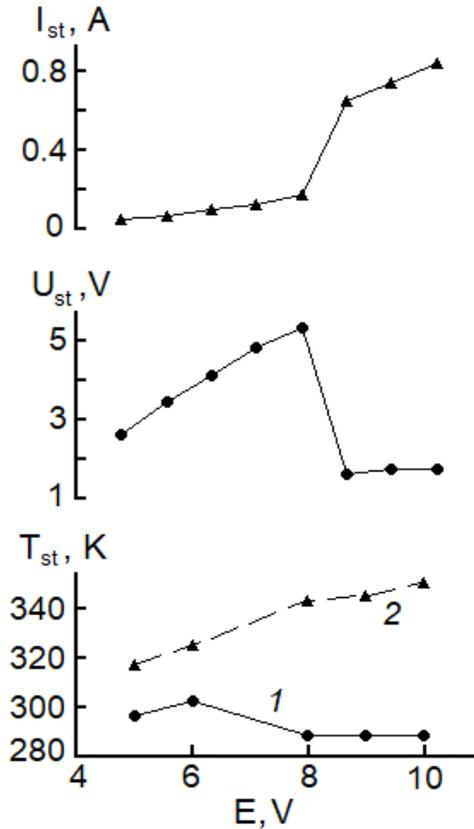


Рисунок 3.9 – Залежності стаціонарних значень струму опору навантаження I_{st} , падіння напруги на ФЕ U_{st} і температур T_{st} ФЕ (крива 1) і терморезистора (крива 2) від напруги E для конструкції ФЕ-терморезистор без теплового контакту між ними

У діапазоні малих E терморезистор не розігрівається до температури ФПМІ, обвідний струм, ним створюваний, незначно зростає, напруга на ФЕ зростає, температури обох зазначених елементів також зростають.

При напругах E достатніх для розігріву терморезистора до температури ФПМІ його опір різко зменшується. Це призводить до появи відповідного значного обвідного струму, суттєвого зниження напруги та температури ФЕ.

3.4. Електричні характеристики фотоелектричного елемента з високим опором у тепловому контакті з терморезистором

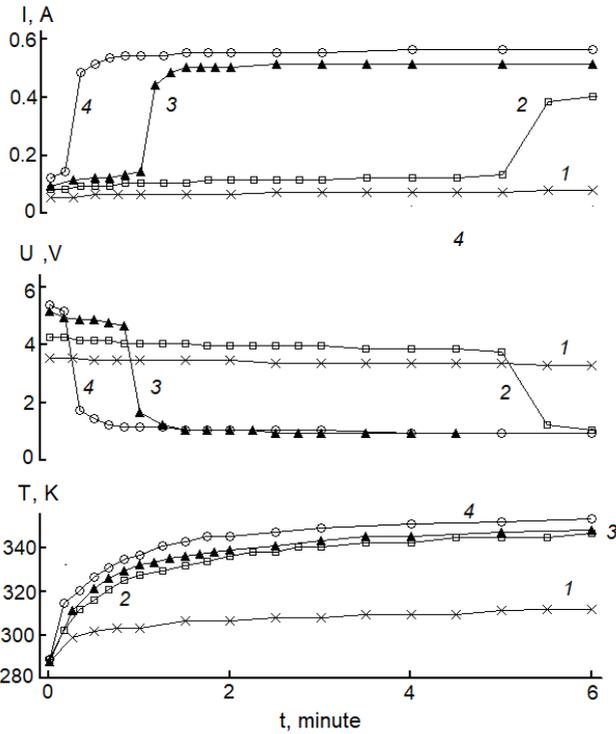
Слід зазначити, що розглянутий варіант конструкції захисту сонячного модуля від наявності ФЕ з підвищеним опором окремим байпасним терморезистором базується на саморозігріванні зазначеного резистора за рахунок електричної потужності, що виділяється на ньому. Тобто для нього, як і для байпасних діодів,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

Однак базова властивість терморезистора реагувати на підвищення температури дозволяє реалізувати конструкції вхідними параметрами, яких можуть виступати теплові фактори.

Одним з варіантів таких конструкцій є структура ФЕ з шаром критичного терморезисторного матеріалу на основі діоксиду ванадію, що знаходиться у тепловому контакті [7].

Кінетичні залежності струму резистора навантаження I , падіння напруги на ФЕ U і температури такої двошарової структури, коли електронний p - n -перехід ФЕ зміщений у зворотному напрямку (тобто має великий опір), показані на рис. 3.10.

Взагалі проаналізовані закономірності аналогічні отриманим для випадку з використанням окремого терморезистора елемента, розглянутого раніше, який не має теплового контакту з фотоелектричним елементом.



- 1 – значення вхідної напруги 5 В;
- 2 – значення вхідної напруги 6 В;
- 3 – значення вхідної напруги 7 В;
- 4 – значення вхідної напруги 7,5 В.

Рисунок 3.10 – Залежність струму опору навантаження I , падіння напруги на ФЕ U та температури T терморезисторного шару від часу при різних значеннях вхідної напруги E для конструкції ФЕ-терморезистор з тепловим контактом

При достатніх напругах для нагрівання терморезисторного шару до температури ФПМІ має місце збільшення струму опору навантаження, що встановився, і зменшення падіння напруги на ФЕ.

До основних відмінностей слід віднести, що залежність температури від часу $T(t)$, практично однакова для ФЕ та терморезисторного шару і має вигляд неспадаючої функції. Напруга джерела живлення, при якій може реалізуватися процес обведення струму через нагрітий до температури ФПМІ значно нижча. Причиною цього є те, що підвищення температури терморезистора досягається як за рахунок самонагрівання, так і за рахунок передачі тепла від фотоелектричного елемента, який теж розігрівається.

Як видно, залежності, що встановилися для струму I_{st} через резистор навантаження та падіння напруги у ньому U_{st} від напруги джерела живлення E , представлені на рис. 3.11 аналогічні, розглянутим для конструкції ФЕ-окремий терморезистор.

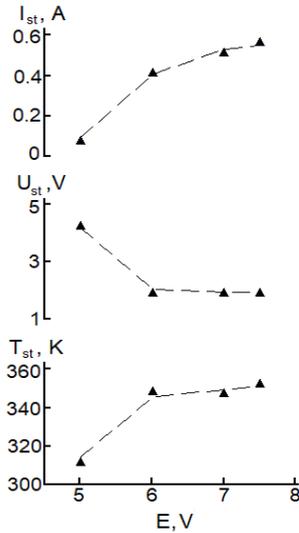


Рисунок 3.11 – Залежності значень струму опору навантаження I_{st} , падіння напруги U_{st} і температури T_{st} ($T_{st} \approx T_{st1} \approx T_{st2}$) досліджуваної структури від напруги E для її конструкції у вигляді ФЕ-терморезистор у тепловому контакті

Однак температура ФЕ не знижується після переходу останнього у низькопровідний стан через тепловий контакт його з терморезисторним шаром.

На закінчення слід відзначити, що наведені у цьому розділі дані дозволяють вважати, що елементи захисту на основі байпасних критичних терморезисторів з ФПМІ, можуть функціонувати як багаторазові (самовідновлювальні) запобіжники від електротеплових перевантажень у сонячних батареях, які реагують безпосередньо на досягнення граничної температури та перенапруги, небажаних при експлуатації фотоелектричних компонентів.

У пасивному стані вони не впливають на функціонування сонячних батарей. При наявності перенапруги та/або аномального підвищення температури вони здатні забезпечити обвідне протікання струму через непрацездатні ФЕ або модулі з підвищеним опором.

Можлива реалізація таких байпасних елементів у варіантах з тепловим контактом з ФЕ та без нього.

Перелік використаних літературних джерел до розділу 3

1. Тонкошкур О. С., Іванченко О. В. (2021) Застосування шару на основі матеріалів з фазовим переходом «метал-напівпровідник» для електротеплового захисту сонячних елементів. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, (3–4), 57–64.

https://old.tkea.com.ua/tkea/2021/3-4_2021/st_08.html

2. Колбунов В. Р., Тонкошкур О. С., Накашидзе Л. В. (2024). Особливості електротеплового захисту сонячних модулів на основі байпасних критичних терморезисторів. *Vidnovluvana energetika*, (1 (76)), 43-50.

[https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1\(76\).43-50](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1(76).43-50)

3. Колбунов В., Тонкошкур О., Мазурик С., Ляшков О., Накашидзе Л., Гладка Ю. (2023) Застосування терморезисторів на основі діоксиду ванадію для електротеплового захисту елементів сонячних батарей. *VIII Всеукраїнська науково-практична конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки,*

інформативних та комп'ютерних систем» (MEICS-2023).
Дніпро. С. 197–198.

https://www.dnu.dp.ua/docs/ndc/2023/materiali%20konf/25_MEICS-2023.pdf

4. Ke, Y., Wang, S., Liu, G., Li, M., White, T. J., & Long, Y. (2018). Vanadium dioxide: The multistimuli responsive material and its applications. *Small*, 14(39), 1802025.

<https://doi.org/10.1002/sml.201802025>

5. Ивон А. И., Кузьменко Е. Н. (2007). Использование критических Терморезисторов для защиты процессора от перегрепа. *Системные технологии*, 2(49), 25–32.

<https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/issue/view/101/74>

6. Toth, J. (2020). PolySwitch PPTC device principals of operation.

<http://studyres.com/doc/7802565/polyswitch-pptc-device-principals-of-operation?page=5>

7. Иванченко О. В., Тонкошкур О. С. (2022). Вплив температури навколишнього середовища на електричні властивості варисторно-позисторної структури. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, (1–3), 3–7.

https://old.tkea.com.ua/tkea/2022/1-3_2022/content.html

8. Ivon, A. I., Chernenko, I. M., Kolbunov, V. R., & Mozharovsky, L. A. (2007). The size effect in current–voltage characteristic of VO₂-based ceramics in the on-state. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 18, 1009–1012.

<https://doi.org/10.1007/s10854-006-9106-3>

9. Kang, D. Y., Rani, A., Yoo, K. J., & Kim, T. G. (2022). Improved threshold switching characteristics of vanadium oxide/oxynitride-based multilayer selector in a cross-point array. *Journal of Alloys and Compounds*, 922, 166192.

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166192>

10. Иванченко О. В., Тонкошкур О. С. (2019). Зміни характеристик кремнієвих фотоелектричних перетворювачів сонячних батарей після струмових перевантажень. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, (3–4), 19–25.

https://old.tkea.com.ua/tkea/2019/3-4_2019/pdf/03.pdf

Розділ 4

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕРМОРЕЗИСТОРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У ЯКОСТІ БАЙПАСНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У СОНЯЧНИХ МОДУЛЯХ

У попередньому розділі наведені результати експериментальних досліджень щодо використання терморезисторних елементів на основі матеріалів з ФПМІ для запобігання перегрівам у колах фотоелектричних систем сонячних батарей. Зокрема встановлено, що склокерамічні терморезисторні елементи на основі діоксиду ванадію та ванадій-фосфатного скла, які стрибкоподібно змінюють величину електричного опору на 1,5–2 порядки в області температури 70°C , можуть функціонувати як байпасні елементи у фотоелектричних модулях. Такі елементи реагують безпосередньо як на наявність перенапруги, так і на збільшення температури в окремих ФЕ зі збільшеним опором, і, таким чином, забезпечують підвищення надійності сонячних батарей взагалі.

Необхідним етапом при обґрунтуванні застосування електричного захисту від перенапруги, який побудований на вищесформульованому принципі, представляється моделювання та аналіз функціонування конкретних схемних рішень для реальних фотоелектричних модулів та інших фотоелектричних систем.

4.1. Система фотоелектричний модуль (підмодуль) – ізолюваний терморезистор та її властивості

4.1.1. Фізичні основи

Наявність у фотоелектричному модулі пасивного фотоелектричного елемента з підвищеним опором (який послідовно підключений) перешкоджає проходженню струму через все коло та віддачі цього струму в навантаження. Крім цього, до пасивного ФЕ прикладається напруга, яка генерується іншими активними фотоелектричними елементами, що може призвести до його

нагрівання та деградації.

При паралельному (байпасному) підключенні критичного терморезистора до пасивного ФЕ терморезистор розігрівається від прикладеної перенапруги, нагрівається та переходить у результаті ФПМІ в стан з низьким (металевим) опором, що і дозволяє протікання струму через цю ділянку кола. У підсумку забезпечується функціонування фотоелектричного модуля у режимі генерації.

Таким чином, електротепловий захист фотоелектричних модулів з використанням терморезисторних елементів може бути реалізований шляхом паралельного підключення окремого терморезистора до пошкодженого або затіненого ФЕ (або їх групи) аналогічно байпасному діоду.

4.1.2. Рівняння моделі

Математична модель, яка дозволяє проаналізувати вплив обмеження перенапруги на фотоелектричний елемент та визначити найбільш ефективні режими такого захисту електричних кіл, заснована на рівняннях теплового балансу.

Систему рівнянь та початкових умов можна записувати у вигляді:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dT_1}{dt} &= P_1 - \frac{T_1 - T_0}{RT_1}; \\ C_2 \frac{dT_2}{dt} &= P_2 - \frac{T_2 - T_0}{RT_2} \\ T_1(0) &= T_2(0) = T_0. \end{aligned} \quad (4.1)$$

де C_1 та C_2 – теплоємності фотоелектричного елемента та терморезистора, значення яких оцінювалися за виразом $C_i = c_i \cdot \rho_i \cdot d_i \cdot S_i$;

c_i – питома теплоємність фотоелектричного (індекс $i=1$) та терморезисторного (індекс $i=2$) елементів ($c_1 = 0,7 \text{ Вт} \cdot \text{с} / \text{г} \cdot \text{К}$, $c_2 = 0,465 \text{ Вт} \cdot \text{с} / \text{г} \cdot \text{К}$);

ρ_i – щільності фотоелектричного (індекс $i=1$) та

терморезисторного (індекс $i=2$) елементів ($\rho_1=2,328 \text{ г/см}^3$, $\rho_2=4,571 \text{ г/см}^3$ [2-3]);

d_i – товщини фотоелектричного та терморезисторного елементів;

S_i – площі фотоелектричного та терморезисторного елементів;

T_i і P_i – температури і електричні потужності фотоелектричного елемента та терморезистора, що перетворюються на теплові;

T_0 – температура навколишнього середовища (прийнято $T_0 = 300 \text{ K}$);

R_{T1} та R_{T2} – теплові опори розсіювання в навколишнє середовище для фотоелектричного та терморезисторного елементів.

Електрична потужність елементів розраховується відповідно до загальних виразів $P_i=U(T_1, T_2)^2/R_i(T_i)$ ($i=1,2$), де:

$$U(T_1, T_2) = E - \frac{E \cdot (R_s + R_{load})}{R_s + R_{load} + \frac{R_1(T_1) \cdot R_2(T_2)}{R_1(T_1) + R_2(T_2)}} \quad (4.2)$$

де R_1, R_2 – електричні опори фотоелектричного елемента та терморезистора;

E – напруга джерела живлення, розраховується за рівнянням

$$E = (n-1) \cdot u_F;$$

R_s – внутрішній опір джерела живлення, розраховується за рівнянням

$$R_s = (n-1) \cdot r_s;$$

u_F – напруга, що генерується окремим освітленим (прямозміщеним) ФЕ;

r_s – електричний опір окремого освітленого ФЕ;

n – число активних ФЕ, які послідовно з'єднані і утворюють фотоелектричний модуль;

R_L – опір навантаження.

Температурна залежність опору зворотно-зміщеного затіненого (або пошкодженого) пасивного ФЕ $R_1(T_1)$ з використанням відомих уявлень [4, 5] може бути апроксимована виразом

$$R_1(T_1) = R_1(T_0) \cdot \exp \left[-\frac{\Delta E_g}{mk} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1} \right) \right], \quad (4.3)$$

де ΔE_g – ширина забороненої зони напівпровідникового матеріалу ФЕ (для кремнію $\Delta E_g = 1,11$ еВ);

k – постійна Больцмана;

m – поправочний коефіцієнт у виразі температурної залежності (4.3) (визначається експериментально). Прийнято $m=2$.

Температурна залежність електричного опору терморезистора на основі діоксиду ванадію описується рівнянням

$$R_2(T_2) = \frac{d_2}{[S_2 \cdot \sigma(T_2)]}, \quad (4.4)$$

де температурна залежність електричної провідності $\sigma(T)$ такого терморезисторного матеріалу, яку можна апроксимувати рівнянням, що аналогічне відомому у фізиці сегнетоелектриків та феромагнетиків закону Кюрі-Вейса [6]:

$$\sigma(T) = \begin{cases} \sigma_l \frac{T_{tr} - 273}{T_{tr} - T}, & \text{if } T < T_{TR}; \\ \sigma_h, & \text{if } T \geq T_{TR}, \end{cases} \quad (4.5)$$

де σ_l та σ_h – електричні провідності терморезистора в низькопровідному (до ФПМІ) та високопровідному (після ФПМІ) станах.

4.1.3. Порівняння розрахункових та експериментальних даних

Теоретичні кінетичні залежності струму фотоелектричного модуля (I), що містить пасивний ФЕ з високим опором та байпасним терморезистором, а також падіння напруги (U) і температур для пасивного ФЕ (T_1) та терморезистора (T_2) представлені на рис. 4.1.

На рис. 4.1 також наведено відповідні експериментальні залежності [7], які свідчать про достатню адекватність запропонованої теоретичної моделі.

У експериментальних дослідженнях та моделюванні використовувалися зразки ФЕ із полікристалічного кремнію з геометричними розмірами $50 \times 10 \text{ мм}^2$, товщиною $0,1 \text{ мм}$ та терморезисторний елемент на основі склокераміки діоксиду ванадію (діаметр 10 мм , товщина $1,5 - 2 \text{ мм}$) [8].

Значення параметрів σ_l та σ_h для виразу (4.5) визначалися з відомої температурної залежності електропровідності використаного критичного терморезистора на основі діоксидної склокераміки [8]. Прийнятний збіг експериментальних та розрахункових кінетичних залежностей електротеплових параметрів, які характеризують процес функціонування байпасного захисту фотоелектричного модуля на основі терморезистора, спостерігався при значеннях їх теплових опорів у межах кількох десятків К/Вт.

Як видно, залежності температур $T_{1,2}(t)$ та струму $I(t)$ структури, що розглядається, різко зростають на початкових ділянках, що корелюється зі спостереженнями для зворотно-зміщених ФЕ у передпробійному режимі [9].

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 та послідовно включеним з ним опором навантаження R_L .

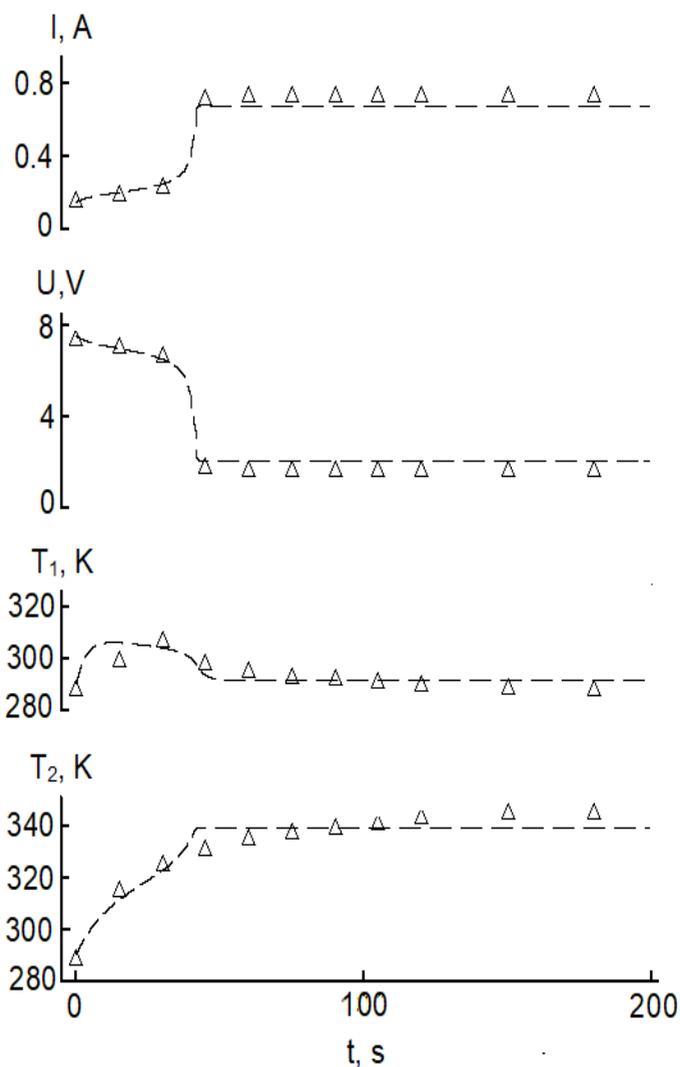


Рисунок 4.1– Залежності струму фотоелектричного модуля через опір навантаження I , падіння напруги на пошкодженому ФЕ з високим опором U , температур ФЕ T_1 і байпасного терморезистора T_2 від часу при значенні перенапруги $E=9$ В та опорах $R_L=10$ Ом, $R_{T1}=24$ К/Вт, $R_{T2}=37$ К/Вт

У процесі релаксації температура байпасного терморезистора збільшується до відповідних значень температури ФПМІ, а температура ФЕ спочатку зростає, а потім зменшується.

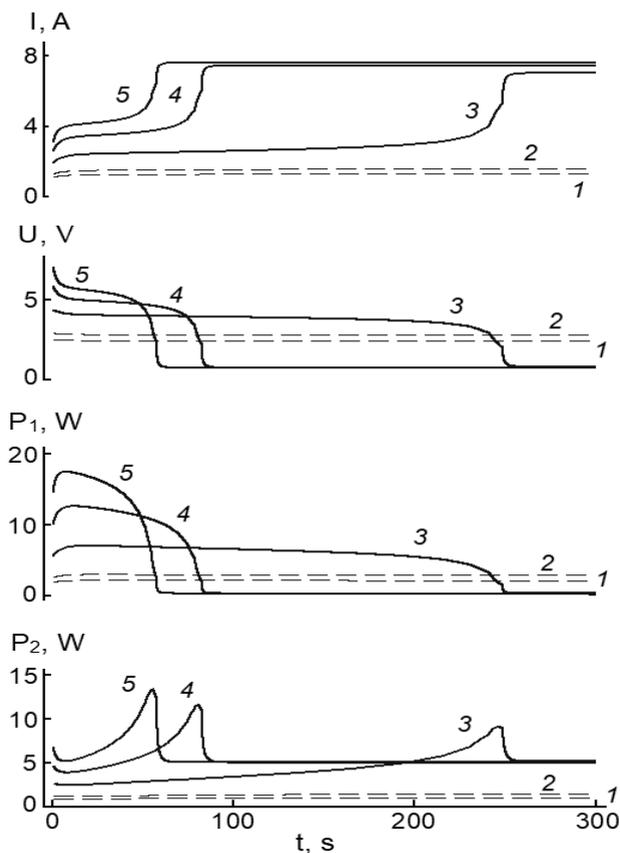
У результаті досягається стабільний стан з постійними значеннями струму падіння напруги та температури системи ФЕ – терморезистор. При цьому падіння напруги та збільшення температури ФЕ незначні. Таким чином реалізується його тепловий та електричний захист.

4.2. Аналіз впливу особливостей електричного та теплового режиму на властивості фотоелемента з байпасним терморезистором

Прийнята модель представлення електричних та теплових характеристик, яка описує процес функціонування байпасних елементів на основі діоксид-ванадієвої склокераміки, дозволяє проаналізувати можливості застосування такого способу захисту від перенапруг та перегрівів для промислових фотоелектричних модулів з фотоелементами великих площ (до 156x156 мм та більше). Це є актуальним для оцінки реальних перспектив такого підходу до цієї проблеми. Природно, при цьому має бути застосований і потужніший (наприклад, багат шаровий) терморезисторний елемент, здатний пропускати струми до 6–10 А.

4.2.1. Вплив величини перенапруги

Теоретичні кінетичні залежності струму модуля та напруги на паралельному з'єднанні пасивного (назад зміщеного) монокристалічного кремнієвого фотоелектричного елемента та теплоізолюваного від нього VO₂-терморезистора, і відповідні залежності розсіюваних ними електричних потужностей P_1 та P_2 при різних значеннях амплітуди напруги, що прикладена показано на рис. 4.2.



1 – напруга джерела живлення 2.8 V;
 2 – напруга джерела живлення 3.36 V;
 3 – напруга джерела живлення 5.6 V;
 4 – напруга джерела живлення 8.4 V;
 5 – напруга джерела живлення 11.2 V.
 $R_L=0$ Ohm;
 $RT_1=5$ K/W; $\gamma_2=15$ K/W

Рисунок 4.2 – Залежності струму модуля I , падіння напруги U на фотоелектричному елементі та потужностей розсіювання фотоелектричного елемента P_1 та терморезистора P_2 від часу при різних значеннях напруги джерела живлення

На рис. 4.3 представлені аналогічні залежності для температур фотоелектричного елемента та терморезисторного елемента.

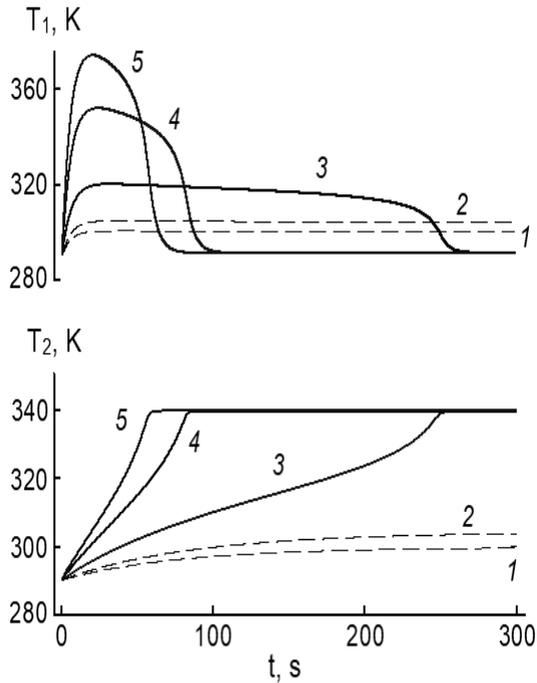


Рисунок 4.3. – Залежність температур фотоелектричного елемента T_1 та терморезистора T_2 від часу. Позначення відповідають прийнятим на рис. 4.2

Наведені результати розрахунків орієнтовані на розміри відомих фотоелектричних елементів з площею $S_1=5.2 \times 15 \text{ cm}^2$ [10] та, відповідно, потужніший багат шаровий терморезистор, наприклад, терморезистор з великими габаритними розмірами на основі раніше описаної діоксид-ванадієвої склокераміки, площа теплообміну якого становила величину $S_2 \approx 15 \text{ cm}^2$.

Відповідно рис. 4.3 зі зростанням величини постійної перенапруги E спостерігається зміна абсолютних значень аналізованих величин, та зміна форми їх кінетичних залежностей.

При малих E величини струму модуля та напруги на фотоелектричному елементі практично не залежать від часу, а електричні потужності, що розсіюються, й температури фотоелектричного елемента і терморезистора дещо зростають.

При більш високих значеннях перенапруги E має місце поступове значне зростання температур фотоелектричного елемента та терморезистора. Якщо електричної потужності достатньо для нагрівання терморезистора до температури його переходу у високопровідний стан T_{tr} , то при її досягненні струм модуля різко зростає, а напруга на фотоелектричному елементі та потужність, що розсіюється ним, зменшуються за рахунок його «закорочування» байпасним терморезистором.

Потужність, що розсіюється терморезистором має максимум зі спадом перемикального характеру, що відповідає досягненню терморезистором температури ФПМІ T_{tr} .

Перерозподіл струму та напруги модуля в паралельному з'єднанні фотоелектричний елемент-терморезистор, що проходить за рахунок переходу останнього у високопровідний стан призводить до зниження температури фотоелектричного елемента з одного боку та її стабілізації для терморезистора з іншого (рис. 4.2).

На рис. 4.4 наведено залежності статичних значень параметрів, що встановилися після релаксації та які відповідають стабільному стану, від прикладеної постійної перенапруги E . Як видно, в цих залежностях виявляються суттєві зміни при досягненні деякою напруги E_{tr} , яка відповідає підвищенню температури терморезистора до точки ФПМІ.

Як видно, у діапазоні $E < E_{tr}$ (для прийнятих значення параметрів розрахунку $E_{tr} \approx 5$ V) при нормальній температурі навколишнього середовища використаний терморезистор не

може бути нагрітий до температури ФПМІ падінням напруги на внутрішньому опорі активного (освітленого) сонячного модуля ΔU_{mod} . Послідовний опір його становить величину порядку $R_{mod} = 10^{-2} - 10^{-1}$ Ohm [11–12]. Таким чином, у даному випадку зазначена напруга для освітленого модуля з 36 фотоелектричними елементами, яка також прикладається до паралельно підключеного терморезистора $U_{mod} \approx 0,56 \times 36 \times R_{mod} < 2 \text{ V} < E_{tr}$ недостатня для його спрацювання.

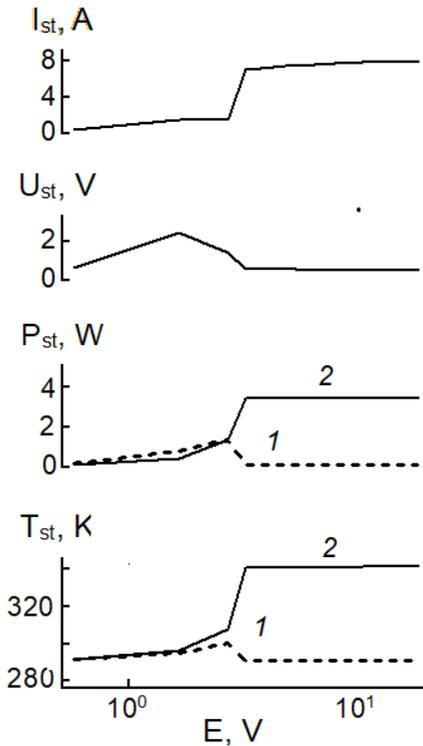


Рисунок 4.4. – Залежності післярелаксаційних значень струму модуля I_{st} , падіння напруги на фотоелектричному елементі U_{st} , розсіюваних потужностей P_{st} та температур T_{st} фотоелектричного елемента (криві 1) і байпасного терморезистора (2) від величин перенапруги E

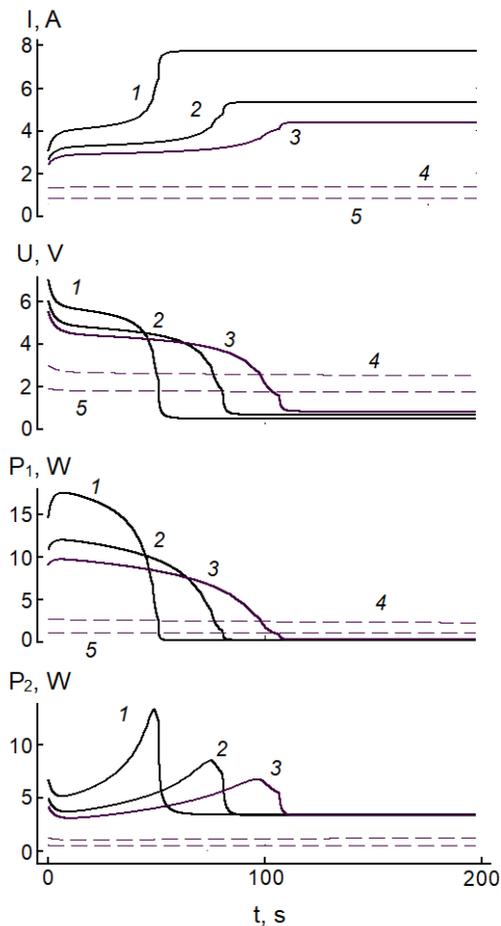
При $E > E_{tr}$, що відповідає появі в модулі хоча б одного пасивного фотоелектричного елемента з високим внутрішнім опором, має місце перемикування терморезистора у високопровідний стан. При цьому значення, що встановилися для струму модуля I_{st} , падіння напруги на фотоелектричному елементі U_{st} , потужностей розсіювання і температур фотоелектричного елемента P_{1st} і T_{1st} та терморезистора P_{2st} і T_{2st} практично незалежні від перенапруги.

4.2.2. Залежність від опору навантаження

Відповідно до сформульованих вище уявлень зменшення перенапруги, прикладеної до паралельного з'єднання фотоелектричний елемент-терморезистор, і зростання струму через нього пов'язані з критичним зменшенням електричного опору терморезистора при його розігріві. Значення струму через байпасний терморезистор можуть досягати значної величини. Ця величина визначається послідовно включеними внутрішнім опором джерела живлення R_E та опором навантаження R_L . Відомо, що опір R_E активної (освітленої) частини фотоелектричного модуля малий. Таким чином, основним струмообмежуючим резистивним елементом у ряді випадків можна вважати опір R_L .

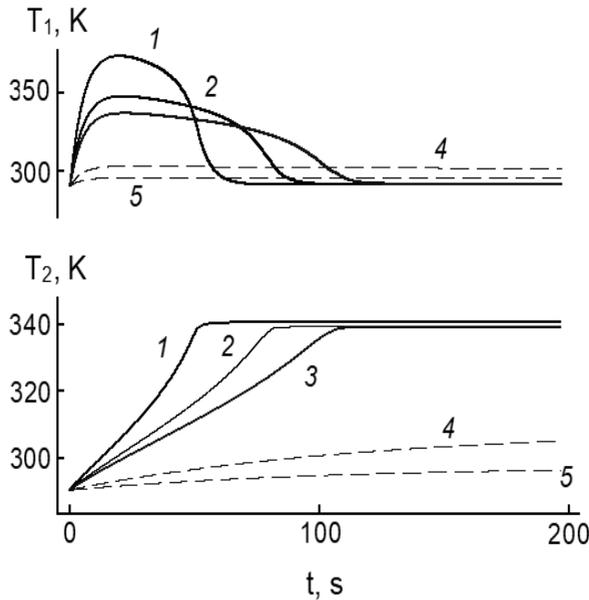
Аналіз впливу опору навантаження на кінетичні залежності процесу переходу байпасного терморезистора у високопровідний стан знаходиться у відповідності до уявлень прийнятої моделі (рис. 4.5 та рис. 4.6).

Відповідно залежності, представленій на рис. 4.6 збільшення опору R_L (і/або R_S) веде до перерозподілу напруги і, відповідно, електричної потужності, що генеруються в колі фотоелектричного модуля таким чином, що зменшується їх частина, що прикладається до пасивного фотоелектричного елемента з підвищеним опором до якого паралельно під'єднаний байпасний терморезистор. Це призводить до закономірностей, які аналогічні описаним у попередньому розділі при зменшенні перенапруги.



1 – значення опору навантаження 0 Ом;
 2 – значення опору навантаження 0,5 Ом;
 3 – значення опору навантаження 1 Ом;
 4 – значення опору навантаження 5 Ом;
 5 – значення опору навантаження 10 Ом
 $E=11,2 \text{ В}; R_{T1}=5 \text{ К/Вм}; R_{T2}=15 \text{ К/Вм}$

Рисунок 4.5. – Залежності струму модуля I , падіння напруги на фотоелектричному елементі U та потужностей розсіювання фотоелектричного елемента P_1 та терморезистора P_2 від часу при різних значеннях опору навантаження R_L



- 1 – значення опору навантаження 0 Ом;
 - 2 – значення опору навантаження 0,5 Ом;
 - 3 – значення опору навантаження 1 Ом;
 - 4 – значення опору навантаження 5 Ом;
 - 5 – значення опору навантаження 10 Ом
- $E=11,2$ В; $R_{T1}=5$ К/Вт; $R_{T2}=15$ К/Вт

Рисунок 4.6. – Залежності температур фотоелектричного елемента T_1 та терморезистора T_2 від часу при різних значеннях опору навантаження

Тобто має місце переміщення кінетичних залежностей $I(t)$, $U(t)$, $P_2(t)$ і $T_2(t)$ і залежностей з максимумом для параметрів $P_1(t)$ і $T_1(t)$ у бік збільшення тривалості процесу і подальшої трансформації їх функцій, які слабко залежать від часу.

Вплив опору навантаження на статичні післярелаксаційні значення струму I_{st} , падіння напруги на

фотоелектричному елементі U_{st} , розсіюваних потужностей P_{st} і температур T_{st} для пасивного фотоелектричного елемента з високим опором та терморезистора наведені на рис. 4.7.

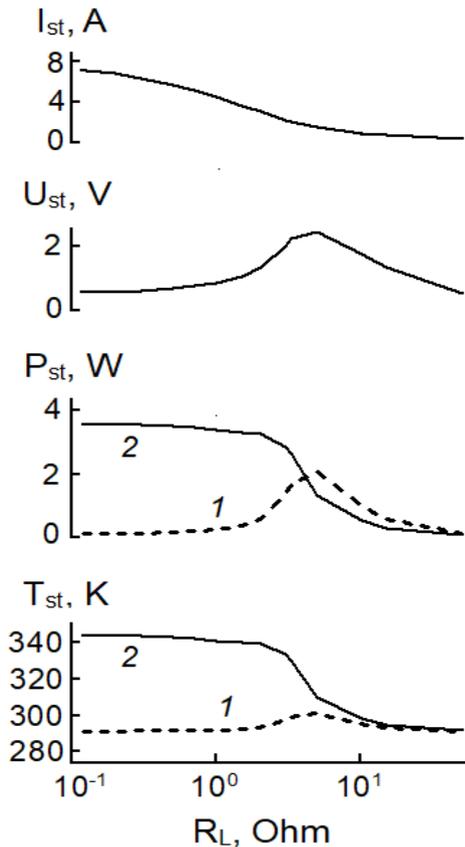


Рисунок 4.7 – Залежності значень струму модуля I_{st} , падіння напруги на фотоелектричному елементі U_{st} , розсіюваних потужностей P_{st} , температур T_{st} фотоелектричного елемента (криві 1), байпасного терморезистора (2) від опору навантаження R_L

Зростання R_L обумовлює зменшення струму модуля I_{st} і, відповідно, температури терморезистора, що призводить до зменшення величини падіння напруги U_{st} на пасивному фотоелектричному елементі з великим опором. У підсумку розсіюваної терморезистором потужності недостатньо для його переходу у високопровідний стан.

4.2.3. Оцінка швидкодії

Швидкодія спрацьовування байпасного терморезисторного елемента оцінена за часом збільшення струму фотоелектричного модуля Δt_{tr} до значення 0,05 від максимального конкретно для кожної кінетичної його залежності.

Як видно із залежності, яка наведена на рис 4.8а величина перехідного процесу істотно зменшується зі зростанням прикладеної напруги E .

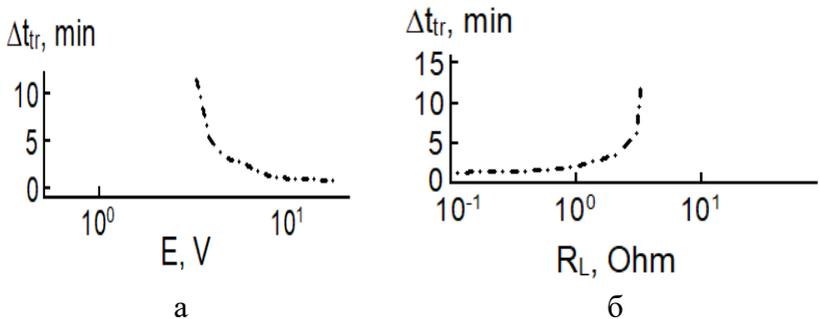


Рисунок 4.8 – Залежність часу переходу терморезистора у високопровідний стан Δt_{tr} від величини перенапруги E (а) та опору навантаження R_L (б)

У разі збільшенні опору навантаження R_L має місце збільшення тривалості перехідного процесу та величини Δt_{tr} .

Слід відмітити, що наведені закономірності відповідають уявленню, що для переходу терморезистора у

високопровідний стан необхідна деяка стабільна доза теплової енергії для розігріву його до температури реалізації ФПМІ у матеріалі терморезистора. Відповідно зростання прикладеної напруги E або зменшення опору навантаження R_L дозволяється температура ФПМІ за менший час.

Відповідно наведеним результатам моделювання представляється обґрунтованим вважати, що байпасні елементи на основі терморезисторних матеріалів з ФПМІ здатні забезпечити підвищення надійності промислових фотоелектричних модулів шляхом реалізації захисту від електричних та теплових навантажень складових їх фотоелементів.

При виникненні електричних перенавантажень відбувається нагрівання терморезистора до температури переходу його у високопровідний стан,

У результаті струм фотоелектричного модуля відновлюється і напруга та розсіювана на пасивному фотоелектричному елементі потужність зменшуються за рахунок його «закорочування» таким байпасним терморезистором.

Перелік використаних літературних джерел до розділу 4

1. Moretón, R., Lorenzo, E., & Narvarte, L. (2015). Experimental observations on hot-spots and derived acceptance/rejection criteria. *Solar energy*, 118, 28-40.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.05.009>

2. Tilli, M., Paulasto-Kröckel, M., Petzold, M., Theuss, H., Motooka, T., & Lindroos, V. (Eds.). (2020). *Handbook of silicon based MEMS materials and technologies*. Elsevier.

https://books.google.bs/books?id=BLMiELHNj9sC&printsec=frontcover&source=gbs_vpt_reviews#v=onepage&q&f=false

3. Martienssen, W., & Warlimont, H. (Eds.). (2006). *Springer handbook of condensed matter and materials data*. Springer Science & Business Media.

<https://typeset.io/pdf/springer-handbook-of-condensed->

matter-and-materials-data-sn0mq9i51a.pdf

4. Chirvase, D., Chiguvare, Z., Knipper, M., Parisi, J., Dyakonov, V., & Hummelen, J. C. (2003). Temperature dependent characteristics of poly (3 hexylthiophene)-fullerene based heterojunction organic solar cells. *Journal of Applied Physics*, 93(6), 3376–3383.

<https://doi.org/10.1063/1.1545162>

5. Musembi, R. J., Rusu, M., Mwabora, J. M., Aduda, B. O., Fostiropoulos, K., & Lux-Steiner, M. C. (2008). Intensity and temperature dependent characterization of eta solar cell. *physica status solidi (a)*, 205(7), 1713–1718.

<https://doi.org/10.1002/pssa.200723466>

6. Tonkoshkur, A. S., & Ivanchenko, A. V. (2019). Electrical properties of structures based on varistor ceramics and polymer nanocomposites with carbon filler. *Journal of Advanced Dielectrics*, 9(03), 1950023.

<https://doi.org/10.1142/S2010135X19500231>

7. Колбунов В., Тонкошкур О., Накашидзе Л., (2024). Особливості електротеплового захисту сонячних модулів на основі байпасних критичних терморезисторів. *Vidnovluvana energetika*, (1 (76)), 43–50.

[https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1\(76\).43-50](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1(76).43-50)

8. Колбунов, В. Р., Тонкошкур, О. С., & Вашерук, О. В. (2022). Електропровідність термочутливої склокераміки на основі нанорозмірного діоксиду ванадія. *Технологія и конструирование в электронной аппаратуре*, (1-3), 39–43.

[https://old.tkea.com.ua/tkea/2022/1-](https://old.tkea.com.ua/tkea/2022/1-3_2022/st_052019)..htm)

[3_2022/st_052019\)..htm](https://old.tkea.com.ua/tkea/2022/1-3_2022/st_052019)..htm)

9. Іванченко О. В., Тонкошкур О. С. (Зміни характеристик кремнієвих фотоелектричних перетворювачів сонячних батарей після струмових переваантажень. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, (3–4), 19–25.

https://old.tkea.com.ua/tkea/2019/3-4_2019/pdf/03.pdf

10. Розміри сонячних елементів, які вибрати сонячні панелі. *iPress.Реклама. 26 жовтня 2021*

https://ipress.ua/articles/rozmiry_sonyachnyh_elementiv_yaki_vybraty_sonyachni_paneli_328282.html

11. Singh, R., Sharma, M., Rawat, R., & Banerjee, C. (2018). An assessment of series resistance estimation techniques for different silicon based SPV modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98, 199-216.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.020>

12. Kraiem, H., Touti, E., Alanazi, A., Agwa, A. M., Alanazi, T. I., Jamli, M., & Sbita, L. (2023). Parameters identification of photovoltaic cell and module models using modified social group optimization algorithm. *Sustainability*, 15(13), 10510.

<https://www.mdpi.com/2071-1050/15/13/10510>

ВИСНОВКИ

Підвищення надійності сонячних батарей являється одною із найбільш актуальних проблем при їх експлуатації. Розвиток досліджень у цьому напрямі стимулюється, головним чином, завданнями розробки ефективних засобів та методів захисту фотоелектричних компонентів від електротеплових перевантажень.

Відомі основні напрями запобігання появи перенапруги і локальних перегрівів у фотоелектричних системах сонячних батарей: оптимальне реконструювання топології сонячної батареї та застосування спеціалізованих пристроїв (байпасних діодів або активних транзисторних схем) для зменшення кількості «гарячих плям» у фотоелектричній батареї. Такі підходи базуються на реакції на електричні перевантаження і, відповідно, дозволяють певною мірою реалізувати захист від них.

Технічні рішення захисту у вигляді двошарових варисторно-позисторних структур пристроїв допускають реакцію на безпосереднє підвищення температури. Тим не менш, вони можуть використовуватися, в основному, в режимі запобіжника (тобто для повернення у вихідний стан можуть вимагати їх знеструмлення).

Таким чином, завдання створення ефективного комплексного електротеплового захисту фотоелектричних компонентів сонячних батарей потребують подальших досліджень.

Елементи захисту на основі критичних терморезисторів з ФПМІ можуть функціонувати як байпасні елементи при реалізації захисту у фотоелектричних модулях. Терморезисторні елементи такого типу можуть забезпечити протікання струму в модулях, мінаючи пасивні фотоелектричні елементи з високим опором, і реагуючи при цьому на такі чинники:

-- наявність електричної перенапруги на фотоелектричних елементах (аналогічно байпасним діодам);

-- досягнення високої температури в них, небажаної при експлуатації фотоелектричних елементів.

Представлені результати можна розглядати як обґрунтування перспективи підходу, що описується, для захисту від електротеплових перевантажень фотоелектричних елементів у фотоелектричних модулях.

Максимальна температура експлуатації найпоширеніших кремнієвих фотоелектричних елементів лежить у межах 60-85°C.

Для варіанта з тепловим контактом фотоелектричний елемент-терморезисторний шар за високих температур (таких, що перевищують температуру стрибка опору в склокераміці) фотоелектричний модуль працюватиме в обвідному режимі. Таким чином, ця температура повинна корелювати з діапазоном допустимих робочих температур фотоелектричного елемента та доцільністю його роботи за таких температур. Слід зазначити, що залежно від складу склокераміки, температура стрибка опору в терморезисторі може змінюватися в межах 65 °С–80°C.

Для фотоелектричних елементів сонячних модулів, максимальна температура експлуатації яких перевищує зазначені граничні температури, важливим є підбір і створення терморезисторних матеріалів з більш високою температурою фазового переходу.

Питання про зниження температури терморезистора та перехід його в пасивний стан після затінення важливе для використання байпасного елемента в режимі комутації. При зворотному переході фотоелектричного елемента в активний (освітлений) високопровідний стан падіння напруги на ньому (і, звичайно ж, на байпасному терморезисторі) має різко зменшитися, тому що генерована послідовним з'єднанням з декількох освітлених фотоелектричних елементів практично рівномірно розподіляється між ними і на кожному з них припадає його частка. Цілком реальна ситуація, коли для байпасного терморезистора цієї напруги буде недостатньо для підтримки його в нагрітому стані та

він перейде низькопровідний стан.

Взагалі слід зазначити, що питання про поведінку терморезистора після переходу фотоелектричного елемента в активний стан, його зв'язок зі структурою і способом підключення модулів заслуговують на окремих детальних досліджень.

*Наукове видання
монографія*

Рекомендовано до друку:
Вченою радою Дніпровського національного університету імені Олеся
Гончара (протокол № 7 від 20.02.2025)

В.Р. Колбунов, О.С. Тонкошкур, Л.В. Накашидзе

**В.Р. Колбунов, О.С. Тонкошкур, Л.В. Накашидзе «Перспективи
використання байпасних терморезисторних елементів в
фотоелектричних модулях сонячних батарей»**
Дніпро: АКЦЕНТ ПП, 2025. – 128 с.

Дизайн обкладинки
Л. О. Датченко (м.Дніпро)

Рецензенти
д. ф.-м. н. Олександр Коваленко (м.Дніпро)
д. ф.-м. н. Сергій Плаксін (м.Дніпро)
д. ф.-м. н. Володимир Гаврилюк (м.Дніпро)

Підписано до друку 13.03.2025.
Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Друк різнографічний
Наклад 300 прим. Зам. № 11293

Видано та віддруковано в ТОВ „Акцент ПП.”
вул. Бердянська, 3-А, м. Дніпро, 49098
тел. (056) 794-61-04(05)
*Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4766 від 04.09.2014*