

Д. ф.-м. н. А. С. ТОНКОШКУР, к. ф.-м. н. А. В. ИВАНЧЕНКО,
к. т. н. Л. В. НАКАШИДЗЕ, С. В. МАЗУРИК

Украина, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

ПРИМЕНЕНИЕ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Проанализированы возможности применения самовосстанавливающихся предохранителей на основе полимерных композитов с нанокремнеземными наполнителями для электрической изоляции «перегретых» фотоэлектрических элементов солнечных батарей. Исследования вольт-амперной и ватт-амперной характеристик проведены с использованием модели структуры, представляющей собой параллельное соединение нескольких последовательно включенных фотоэлектрических элементов и указанных предохранителей. Рассмотрено влияние температуры окружающей среды и дрейфа сопротивления предохранителей в проводящем состоянии в процессе их многократного срабатывания. Установлено, что предложенные элементы защиты не влияют на работу солнечных батарей в рабочем диапазоне температур и могут применяться для электрической изоляции локальных областей и компонентов солнечных батарей с повышенной температурой.

Ключевые слова: самовосстанавливающийся предохранитель, полимерный нанокompозит, фотоэлектрический элемент, вольт-амперная характеристика, кривая мощности, перегрев.

Солнечные батареи являются одними из наиболее перспективных источников возобновляемой электроэнергии. Они состоят из десятков и сотен тысяч отдельных фотоэлектрических (PV, photovoltaic) элементов, соединенных параллельно-последовательно с целью обеспечения требуемых номиналов тока и напряжения. Одним из определяющих факторов обеспечения оптимального режима функционирования и надежности таких многокомпонентных систем является идентичность фотоэлектрических характеристик PV-элементов.

В процессе эксплуатации, однако, в PV-элементах и их соединениях возникают различные дефекты (из-за коррозии, миграции металла через $p-n$ -переход, ухудшения качества контактов и антиотражающего покрытия, коротких замыканий и обрыва соединительных проводов и т. д. [1]). Вместе с функционированием в условиях меняющейся неоднородной освещенности это приводит к так называемым несоответствиям (различиям) между параметрами отдельных элементов и их групп, в результате чего возникают их локальные перегревы и интенсифицируются процессы деградации [1–3].

В настоящее время наиболее известным способом снижения влияния несоответствия, в частности, в фотоэлектрических модулях (PVM) при последовательном соединении PV-элементов является использование шунтирующих обводных

диодов, при параллельном соединении — блокирующих диодов [1, 4–6]. Это позволяет снизить потери энергии, связанные с неоднородностью освещения солнечных батарей, но при этом далекие до полного решения остаются проблемы, связанные с перегревом. Наиболее известные из них:

- наличие локальных точек разогрева типа «горячих пятен» непосредственно в PV-элементах или в их приконтактных областях [2, 3], вызванных короткими замыканиями и деградационными процессами;

- электрический разогрев диодов в PVM и в панелях батарей, а также зависимость их функциональных свойств от температуры [1].

Поскольку повышенная температура стимулирует деградацию PV-элементов (а также обводных и блокирующих диодов) [2, 3, 7, 8], с целью увеличения срока службы солнечных батарей в ряде случаев может быть целесообразным временное отключение (изоляция) некоторых ее элементов. Одним из перспективных решений такой задачи представляется использование в качестве дополнительных устройств для изоляции неактивных (затененных или дефектных) областей как отдельных PV-элементов, так и их модулей, самовосстанавливающихся PPTC-предохранителей (PPTC, polymeric positive temperature coefficient) типа PolySwiTh, представляющих собой полимерные композиты

с наноразмерными углеродными наполнителями. Базовое функциональное свойство РРТС-предохранителя — скачкообразное, на несколько порядков, увеличение электрического сопротивления при достижении некоторой пороговой температуры и возврат в исходное высокопроводящее состояние при понижении температуры [9, 10].

РРТС-предохранители эффективно защищают источники питания в случае короткого замыкания или перегрузки по току. В частности, такие элементы нашли применение как устройства электрической и тепловой защиты в аккумуляторах и гальванических источниках питания [11–15]. Так, ленточные элементы PolySwitch разработаны для защиты никель-кадмиевых, никель-гидридометаллических и литий-ионных аккумуляторных батарей, используемых в телефонных аппаратах сотовой связи, компьютерах типа «Ноутбук» и другом переносном электронном оборудовании. Сверхплоские компоненты можно приваривать непосредственно на элементы батареи для их защиты от перегрева, вызванного коротким замыканием или перегрузкой по току. При устранении неисправности сопротивление прибора возвращается к своему исходному низкоомному значению, и батарею можно использовать снова. Такая защита может выполняться многократно, предотвращая необратимые деградиационные процессы в защищаемых элементах и не вызывая их разрушение.

К достоинствам таких структур на основе полимерных композитов с наноуглеродными наполнителями можно отнести:

- сопротивление, близкое к сопротивлению металлов, при температуре ниже температуры переключения и близкое к сопротивлению изолятора при температуре выше нее [9, 10];

- возможность реализации в виде дискретных элементов и непрерывных пленок-лент [13, 14] (что важно при выполнении изоляции локальной дефектной области отдельного РВ-элемента);

- возможность временного отключения отдельных разогретых неактивных (например, затененных) компонентов солнечной батареи от общей электрической цепи [9, 10].

В настоящей работе исследованы возможности применения предохранителей на основе полимерных композитов с наноуглеродными наполнителями для изоляции «перегретых» фотоэлектрических элементов, изучено их влияние на работу солнечной батареи в рабочем диапазоне температуры и способность выполнять свою функцию в нештатных ситуациях, связанных с перегревом.

Образцы для исследований

Типичная температурная зависимость сопротивления РРТС-предохранителя представлена на рис. 1 ($R_{1\max}$ — максимальное сопротивление восстановления, т. е. сопротивление через 1 час после срабатывания).

Скачкообразная форма представленной на рис. 1 зависимости определяется структурными особенностями основного функционального материала РРТС-предохранителя, который представляет собой нанокомпозит с непроводящей полимерной матрицей (например, из полиэтилена) и высокопроводящим наполнителем (как правило, техническим углеродом). Благодаря наличию углеродных каналов в структуре РРТС-предохранителя, он является проводником с низким собственным сопротивлением при температурах T ниже температуры его срабатывания (участок 1 на рис. 1). При разогреве выше определенной температуры (температуры перехода T_{Π}) каналы, состоящие из частиц углерода, разрываются за счет объемного расширения полимерной матрицы и/или трансформации кристаллической структуры матрицы в аморфную, и электрическое сопротивление рассматриваемой структуры резко возрастает (участок 2) [10, 16, 17]. На участке 3 структура проводящих каналов полностью разрушается и сопротивление РРТС-предохранителя достигает максимальной величины.

Рабочий диапазон температур, где гарантируется низкопроводящее состояние, для коммерческих РРТС-предохранителей составляет от -40 до 125°C или до 85°C , при этом известны и более низкотемпературные их типы с максимальной температурой 60°C [18, 19]. Температура перехода T_{Π} для известных РРТС-предохранителей лежит в диапазоне $90–125^{\circ}\text{C}$ [20], т. е. может находиться несколько выше максимальной температуры рабочего диапазона.

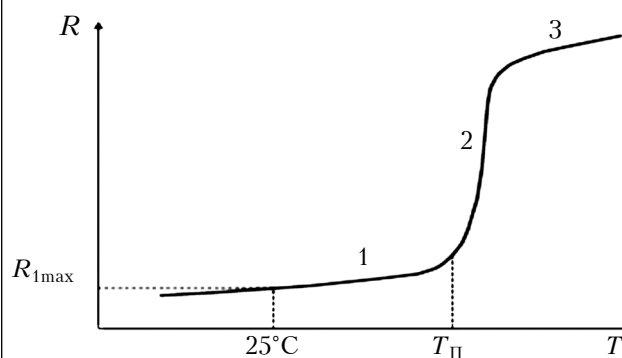


Рис. 1. Зависимость сопротивления РРТС-предохранителя от температуры (в логарифмическом масштабе) [10]

В исследованиях использовались образцы PV-элементов из монокристаллического кремния КДБ-10 с просветляющим покрытием на основе ITO [21] и РРТС-предохранители типа FRX375-60F.

Методика исследований

Для экспериментального изучения возможностей самовосстанавливающихся предохранителей рассматриваемого типа для защиты от перегрева или короткого замыкания компонентов солнечных батарей исследовалась модель структуры, представляющей собой параллельное соединение нескольких последовательно включенных PV-элементов и РРТС-предохранителей, роль нагрузки выполнял переменный резистор.

Выбор такой структуры определялся тем, что она соответствует соединению фотоэлектрических модулей в солнечных панелях и батареях, а также тем, что ее можно рассматривать как дискретное представление отдельного солнечного PV-элемента, где элементы модели соответствуют локальным областям отдельной солнечной «клетки» (которые соизмеримы с областями локального разогрева или короткого замыкания).

Для измерения вольт-амперной $I(U)$ характеристики (**ВАХ**) и кривой мощности $P(U)$ использовалась известная измерительная схема вольтметра-амперметра [22].

Роль источника света выполнял имитатор солнечного излучения, моделирующий условия АМ1,5. Для исследований при повышенной температуре модель солнечной батареи помещалась в разогретый термостат, а после каждого такого измерения охлаждалась до комнатной температуры в свободном режиме.

Влияние наличия РРТС-предохранителей на фотоэлектрические характеристики модели

На рис. 2 приведены характеристики модели солнечной батареи, состоящей из шести включенных параллельно образцов PV-элементов, при использовании самовосстанавливающихся предохранителей и без них.

Последовательность проведения исследований была следующей. При комнатной температуре T_K измерялись ВАХ и кривая мощности модели без и с подключением предохранителей, которые при T_K находятся в высокопроводящем состоянии. Далее одна из цепей «PV-элемент — РРТС-предохранитель» нагревалась до температуры выше температуры срабатывания T_C предохранителя ($T_C \approx T_{II}$), затем охлаждалась до T_K , после чего снова проводились измерения.

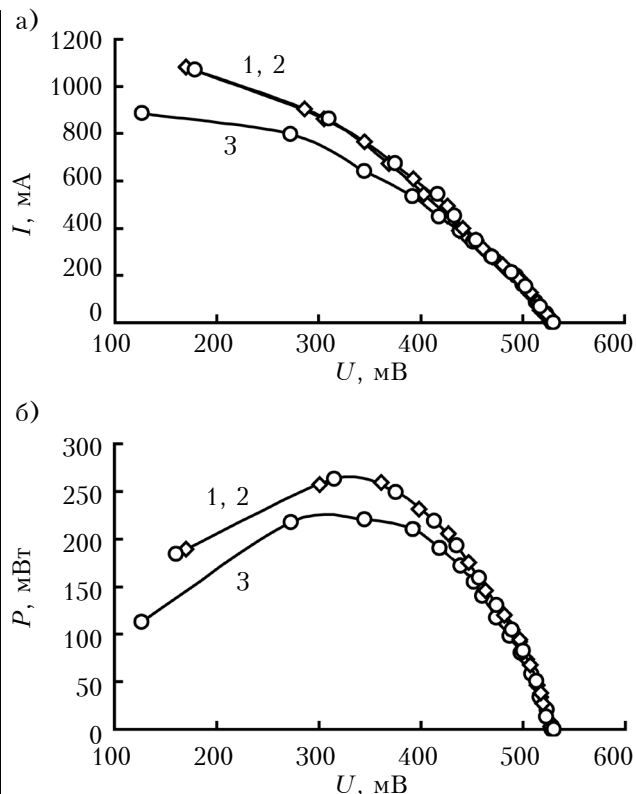


Рис. 2. ВАХ (а) и кривые мощности (б) модели солнечной батареи без (1) и с РРТС-предохранителями (2, 3):

1, 2 — все PV-элементы имеют комнатную температуру; 3 — один PV-элемент нагрет до температуры выше T_{II}

Как видно из рис. 2 (кривые 1, 2) наличие самовосстанавливающихся предохранителей в электрической схеме модели солнечной батареи не влияет на ее фотоэлектрические характеристики в случае исправности всех ее PV-элементов.

На рис. 2 (кривая 3) представлены характеристики исследуемой модели солнечной батареи при наличии отказа, т. е. когда одна из цепей «PV-элемент — РРТС-предохранитель» имеет температуру выше точки перехода блокирующего предохранителя в низкопроводящее (изолирующее) состояние. Это состояние может достигаться и за счет увеличения температуры указанной цепи, и за счет подогрева его электрическим током. Как видно, такой отказ (перегрев) отдельных элементов приводит к тем же результатам, что и при использовании механического отключения или блокирования с использованием диодов.

Влияние температуры окружающей среды на функционирование модели с РРТС-предохранителями

Как было показано выше, электрические характеристики РРТС-предохранителей сильно за-

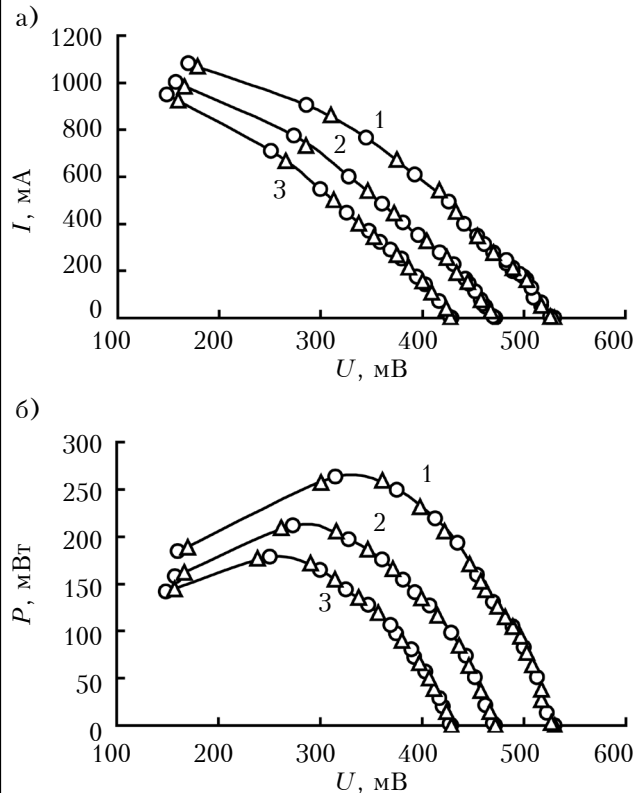


Рис. 3. ВАХ (а) и кривые мощности (б) модели солнечной батареи без (О) и с РРТС-предохранителями (Δ) при различных значениях T_{OC} : 1 – 25°C; 2 – 40°C; 3 – 55°C

висят от температуры окружающей среды T_{OC} . В связи с этим представляется важным определить, не повлияет ли этот факт на функциональные свойства солнечных батарей при применении РРТС-предохранителей для реализации защиты батарей и их узлов от перегрева. С этой целью при различных значениях T_{OC} , меньших температуры срабатывания T_C РРТС-предохранителей, были измерены ВАХ и кривые мощности исследуемой модели. Как видно из рис. 3, во всем диапазоне ниже T_C характеристики солнечных батарей не зависят от наличия предохранителей.

Следует отметить, что при применении РРТС-структур в качестве защиты от больших токов температурный фактор обуславливает специфику их поведения. В частности, при повышении T_{OC} имеет место некоторое уменьшение тока и времени срабатывания предохранителя. Чем больше T_{OC} , тем меньшая электрическая мощность требуется для достижения температуры перехода РРТС-структуры в низкопроводящее состояние, а также быстрее происходит ее нагрев. Диапазон времени срабатывания составляет от единиц миллисекунд до нескольких секунд [9, 10].

Стабильность фотоэлектрических характеристик модели с РРТС-предохранителями

Спецификой работы РРТС-предохранителя является то, что после вызванного тепловым переключением срабатывания требуется достаточно продолжительное время для его восстановления. Оно может длиться сутками и более и не бывает полным в течение реального времени работы устройства при реальных значениях температуры окружающей среды ($T_{OC} \approx 20^\circ\text{C}$) [23]. В связи с этим для характеристики кинетики процесса восстановления используется параметр $R_{1\max}$ — сопротивление предохранителя после одного часа восстановления при заданной температуре окружающей среды.

После каждого срабатывания сопротивление РРТС-предохранителя в проводящем состоянии может дрейфовать и, как правило, несколько увеличивается. Результаты измерений, которые проводились при включении в цепь солнечной батареи предохранителей, подвергавшихся разному числу циклических срабатываний, показали, что диапазон этого дрейфа незначителен, а значит можно говорить об отсутствии влияния указанных кинетических тепловых эффектов на стабильность фотоэлектрических характеристик рассматриваемых объектов. Этот вывод согласуется с тем, что гарантируемое изготовителями РРТС-предохранителей число переходов от проводящего состояния к непроводящему и обратно составляет порядка нескольких тысяч, т. е. практически неограниченно. К тому же, в рабочем (высокопроводящем) состоянии РРТС-предохранители, как правило, имеют достаточно низкое сопротивление, которое либо практически не изменяется [24], либо его изменения небольшие [23] и не сказываются на работе и характеристиках как защищаемого устройства, в данном случае фотоэлектрического элемента, так и других электронных приборов.

Выводы

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод, что рассматриваемые элементы защиты на основе полимерных композитов с нанотрубочными наполнителями функционируют как многократные (самовосстанавливающиеся) предохранители, которые не нуждаются в замене и обеспечивают работу солнечных батарей в рабочем диапазоне температур, предохраняя их от токовой (тепловой) перегрузки.

Вместе с тем, однако, необходимо отметить следующее. Температура начала фазового перехода (срабатывания) наиболее распространенных в настоящее время типов коммерческих РРТС-предохранителей составляет око-

ло 80°C, а существенное изменение сопротивления наблюдается при более высоких температурах. При этом максимальная рабочая температура фотоэлектрических модулей не превышает 80°C. Такая ситуация в определенной мере ограничивает широкое использование РРТС-предохранителей как элементов защиты от перегрева, особенно если причина перегрева временная.

Учитывая широкий диапазон параметров (значений тока переключения, сопротивления в высоко- и низкопроводящем состояниях и т.д.) РРТС-предохранителей, полученные результаты можно рассматривать как свидетельство перспективности их использования для защиты компонентов солнечных батарей в случаях короткого замыкания или перегрузки по току, приводящих к перегревам различного типа и другим нештатным ситуациям. С другой стороны, представляется перспективным использование применяемых в них полимерных нанолитеродных композитов в качестве изоляции поврежденных (деградировавших) локальных областей РВ-элементов. В этом направлении представляется наиболее важной разработка ленточных РРТС-предохранителей с низкой температурой срабатывания.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Honsberg C., Bowden S. Welcome to PVCDROM [Electronic resource]. — 2017. — Mode access: <http://www.pveducation.org/pvcdrom>.
2. Silvestre S., Chouder A. Effects of shadowing on photovoltaic module performance // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. — 2008. — Vol. 16, N 2. — P. 141–149. — <https://doi.org/10.1002/pip.780>
3. Tsanakas J. A., Botsaris P. N. An infrared thermographic approach as a hot-spot detection tool for photovoltaic modules using image histogram and line profile analysis // International Journal of Condition Monitoring. — 2012. — Vol. 2, N 1. — P. 22–30. — <https://doi.org/10.1784/204764212800028842>
4. Silvestre S., Boronat A., Chouder A. Study of bypass diodes configuration on PV modules // Applied Energy. — 2009. — Vol. 86, iss. 9. — P. 1632–1640. — <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.01.020>
5. Ji Eun Lee, Soohyun Bae, Wonwook Oh et al. Investigation of damage caused by partial shading of $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{Se}_2$ photovoltaic modules with bypass diodes // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. — 2016. — Vol. 24, iss. 8. — P. 1035–1043. — <https://doi.org/10.1002/pip.2738>
6. Karatepe E., Boztepe M., Colak M. Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells // Solar Energy. — 2007. — Vol. 81, iss. 8. — P. 977–992. — <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.12.001>
7. Kurtz S., Whitfield K., Tamizh Mani G. et al. Evaluation of high-temperature exposure of photovoltaic modules // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. — 2011. — Vol. 19, iss. 8. — P. 954–965. — <https://doi.org/10.1002/pip.1103>
8. Зезин Д. А. Деградационные процессы в тонкопленочных солнечных элементах / Дис. ... канд. техн. наук. — Москва: Нац. иссл. ун-т «МЭИ», 2014.
9. Трусов В.А., Гусев А.М. Элементы защиты электрических цепей от перенапряжений и сверхтоков // Тр. Междунар. симпозиума «Надежность и качество». — 2011. — Т. 2. — С. 221–224.
10. Гавриков В. Самовосстанавливающиеся РТС-предохранители для защиты от токовых перегрузок // Новости электроники. — 2014. — № 12. — С. 11–15.
11. Pat. 5963019 USA. Battery pack with battery protection circuit / Kyung-Yong Cheon. — 05.10.99.
12. Pat. 6608470 USA. Overcharge protection device and methods for lithium based rechargeable batteries / J. W. Oglesbee, A. G. Burns. — 19.08.03.
13. Pat. 6282072 USA. Electrical devices having a polymer PTC array. / A. D. Minervini, T. K. Nguyen. — 28.08.01.
14. Protecting rechargeable Li-ion and Li-polymer batteries [Electronic resource]: Littelfuse, Inc. — 2017. — Mode access: http://www.littelfuse.com/~media/electronics/application_notes/littelfuse_protecting_rechargeable_li_ion_and_li_polymer_batteries_in_consumer_portable_electronics_application_note.pdf.pdf
15. Pat. 4973936 USA. Thermal switch disc for short circuit protection of batteries / E. C. Dimpault-Darcy, B. J. Bragg. — 27.11.90.
16. Каминская Т. П., Домкин К. И. Самовосстанавливающиеся предохранители для автомобильной электроники // Электронные компоненты. — 2008. — № 5. — С. 80–82.
17. Тонкошкур О. С., Игнаткин В. У. Фізичні основи електричного контролю неоднорідних систем: навчальний посібник. — Дніпродзержинськ: Дніпродзержинський державний технічний університет, 2010.
18. Хухтиков С. «Восстановить работоспособность!». Самовосстанавливающиеся РРТС-предохранители MultiFuse // Новости электроники. — 2015. — № 1. — С. 37–41.
19. Самовосстанавливающиеся предохранители [Электронный ресурс]: Терраэлектроника. — 2018. — Режим доступа: <https://www.terraelektronika.ru/catalog/samovosstanavlivayushchiesya-predohraniteli-1522> [Self-healing fuses [Electronic resource]: Terraelektronika. — 2018.
20. Application note. Polyswitch strap devices. Help protect rechargeable battery packs [Electronic resource] / Tyco Electronics Corporation, 2008. — Mode access: https://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/Tyco_8004/PDF/TE_Strap_Device.pdf
21. Накашидзе Л. В., Кныш Л. И. Методология определения состава и схемных решений солнечных фотоэлектрических установок // Авиационно-космическая техника и технология. — 2008. — № 10 (57). — С. 100–104.
22. Колтун М. М. Оптика и метрология солнечных элементов. — Москва: Наука, 1985.
23. Jim Toth. PolySwitch PPTC device principals of operation [Electronic resource]. — Mode access: <http://studyres.com/doc/7802565/polyswitch-pptc-device-principals-of-operation?page=5>
24. Белых С. Новый инновационный самовосстанавливающийся компонент защиты для силовых литий-ионных аккумуляторов // Компоненты и технологии. — 2011. — № 2. — С. 50–53.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 09.02 2017 г.*

О. С. ТОНКОШКУР, О. В. ИВАНЧЕНКО, Л. В. НАКАШИДЗЕ, С. В. МАЗУРИК

Україна, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

ВИКОРИСТАННЯ САМОВІДНОВЛЮВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗАХИСТУ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

Прояв і утворення в процесі експлуатації в реальних фотоелектричних елементах і їх з'єднаннях різних дефектів, а також їхня робота в режимі мінливої неоднорідної освітленості призводять до так званих невідповідностей (відмінності електричних характеристик) між окремими елементами і групами елементів. Через це виникають їхні локальні перегріву й інтенсифікуються процеси деградації.

З метою збільшення терміну служби сонячної батареї у ряді випадків представляється доцільним тимчасове відключення (ізоляція) відповідних її елементів.

У даній роботі пропонується використовувати додаткові пристрої для ізоляції перегрітих елементів (і/або компонентів) сонячних батарей — самовідновлювані запобіжники типу "PolySwith". Ці структури являють собою полімерні композити з нанорозмірними вуглецевими наповнювачами. Їх базова функціональна властивість — стрибкоподібне збільшення електричного опору на кілька порядків за досягнення деякої граничної температури і повернення у вихідний високопровідний стан при зниженні температури.

Досліджено можливості застосування запобіжників указанного типу для ізоляції «перегрітих» фотоелектричних елементів. Основну увагу приділено вивченню впливу запобіжників на роботу сонячної батареї в робочому діапазоні температур та їхньої функціональної придатності в позаштатних ситуаціях, пов'язаних з перегрівом.

Дослідження проведені з використанням моделі структури, що представляє собою паралельне з'єднання декількох послідовно включених фотоелектричних елементів і зазначених запобіжників. Проаналізовано вплив на роботу такої структури температури навколишнього середовища та дрейфу опору запобіжників у провідному стані в процесі їхнього багаторазового спрацьовування.

Установлено, що запропоновані елементи захисту не впливають на роботу сонячних батарей у робочому діапазоні температур і є функціонально придатними для електричної ізоляції локальних областей і компонентів сонячних батарей з підвищеною температурою.

Ключові слова: самовідновлюваний запобіжник, полімерний нанокомпозит, фотоелектричний елемент, вольт-амперна характеристика, крива потужності, перегрів.

DOI: 10.15222/TKEA2018.1.43
UDC 621.31

A. S. TONKOSHKUR, A. V. IVANCHENKO,
L. V. NAKASHYDZE, S. V. MAZURIK

Ukraine, Oles Honchar Dnipro National University

E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

APPLICATION OF RESETTABLE ELEMENTS FOR ELECTRICAL PROTECTION OF SOLAR BATTERIES

The manifestation and formation of various defects in the process of exploitation in real photovoltaic cells and their compounds as well as their work in the regime of changing non-uniform illumination lead to the so-called series and parallel inconsistencies (differences of electrical characteristics) between separate cells and their groups. This results in local overheating and intensifying of degradation processes.

In some cases temporary disconnection (isolation) of the corresponding elements of the solar batteries is more appropriate in order to increase their service life.

In this work additional devices for insulation of overheating cells (and/or components) of solar batteries such as «PolySwith» resettable fuses are proposed to be used as a perspective solution of such problems. These structures are polymer composites with nanosized carbon fillers. Electrical resistance of such a fuse increases abruptly by several orders of magnitude when certain threshold temperature is reached, and when the temperature decreases the fuse returns to its initial high-conductivity state.

This study investigates the possibilities of using the specified type of fuses for electrical insulation of «overheated» photovoltaic cells. Particular attention is paid to the research of the effect of fuses on the working of the solar batteries in the operating temperature range and their functional applicability in emergency situations associated with overheating. The studies were carried out using a model structure of several series of parallel connected photovoltaic cells and specified fuses. Attention is paid to the influence of such factors as the ambient temperature and the drift of the fuses resistance in the conducting state in the process their multiple switching.

It has been established that such protection elements do not influence the work of solar batteries in operating temperature range and are functionally applicable for the electrical isolation of local regions and components of solar batteries with increased temperature.

Keywords: resettable fuse, polymer nanocomposite, photovoltaic cell, current-voltage characteristics, power curve, overheating.

REFERENCES

1. Honsberg C., Bowden S. *Welcome to PVCDROM* [Electronic resource]. 2017, mode access: <http://www.pveducation.org/pvcdrom>
2. Silvestre S., Chouder A. Effects of shadowing on photovoltaic module performance. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2008, vol. 16, no. 2, pp. 141-149. <https://doi.org/10.1002/pip.780>
3. Tsanakas J. A., Botsaris P. N. An infrared thermographic approach as a hot-spot detection tool for photovoltaic modules using image histogram and line profile analysis. *International Journal of Condition Monitoring*, 2012, vol. 2, no. 1, pp. 22-30. <https://doi.org/10.1784/204764212800028842>
4. Silvestre S., Boronat A., Chouder A. Study of bypass diodes configuration on PV modules. *Applied Energy*, 2009, vol. 86, iss. 9, pp. 1632-1640. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.01.020>
5. Ji Eun Lee, Soohyun Bae, Wonwook Oh, Hyomin Park, Soo Min Kim, Dongho Lee, Junggyu Nam, Chan Bin Mo, Dongseop Kim, JungYup Yang, Yoonmook Kang, Hae-seok Lee, Donghwan Kim. Investigation of damage caused by partial shading of $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{Se}_2$ photovoltaic modules with bypass diodes. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2016, vol. 24, iss. 8, pp. 1035-1043. <https://doi.org/10.1002/pip.2738>
6. Karatepe E., Boztepe M., Colak M. Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells. *Solar Energy*, 2007, vol. 81, iss. 8, pp. 977-992. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.12.001>
7. Kurtz S., Whitfield K., Tamizhmani G., Koehl M., Miller D., Joyce J., Wohlgemuth J., Bosco N., Kempe M., Zgonena T. Evaluation of high-temperature exposure of photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2011, vol. 19, iss. 8, pp. 954-965. <https://doi.org/10.1002/pip.1103>
8. Zevin D. A. *Dis. kand. tekhn. nauk* [Degradation processes in thin-film solar cells]. Moscow, 2014, 129 p. (Rus)
9. Trusov V.A., Gusev A.M. [Elements of protection of electrical circuits against overvoltages and overcurrents]. *Proc. of Int. Symp. "Reliability and Quality"*, 2011, vol. 2, pp. 221-224 (Rus)
10. Gavrikov V. [Self-healing PTC fuses for protection of current overload]. *Novosti Elektroniki*, 2014, no. 12, pp. 11-15. (Rus)
11. Kyung-Yong Cheon. *Battery pack with battery protection circuit*. Pat. USA no. 5963019, 1999.
12. J. W. Oglesbee, A. G. Burns. *Overcharge protection device and methods for lithium based rechargeable batteries*. Pat. USA, no. 6608470, 2003.
13. A. D. Minervini, T. K. Nguyen. *Electrical devices having a polymer PTC array*. Pat. USA, no. 6282072, 2001.
14. *Protecting rechargeable Li-ion and Li-polymer batteries* [Electronic resource]: Littelfuse, Inc., 2017, mode access: http://www.littelfuse.com/~media/electronics/application_notes/littelfuse_protecting_rechargeable_li_ion_and_li_polymer_batteries_in_consumer_portable_electronics_application_note.pdf.pdf
15. E. C. Dimpault-Darcy, B. J. Bragg. *Thermal switch disc for short circuit protection of batteries*. Pat. USA, no. 4973936, 1990.
16. Kaminskaya T. P., Domkin K. I. [Self-healing fuses for automotive electronics]. *Elektronnyye komponenty*, 2008, no. 5, pp. 80-82. (Rus)
17. Tonkoshkur O. S., Ignatkin V. U. *Fizichni osnovi elektrichnogo kontrolyu neodnorodnikh sistem* [Physical bases of electrical control of inhomogeneous systems: educational textbook]. Dniprodzerzhynsk State Technical University, 2010, 290 p. (Ukr)
18. Khukhtikov S. [Restore working capacity! ». Self-healing PPTC-fuses MultiFuse]. *Novosti Elektroniki*, 2015, no. 1, pp. 37-41. (Rus)
19. [Self-healing fuses [Electronic resource]: Terraelektronika], 2018, mode access: <https://www.terraelektronika.ru/catalog/samovosstanavlivayuschiesya-predohraniteli-1522> (Rus)
20. Application note. *Polyswitch strap devices. Help protect rechargeable battery packs* [Electronic resource]. Tyco Electronics Corporation, 2008, mode access: https://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/Tyco_8004/PDF/TE_Strap_Device.pdf
21. Nakashidze L. V., Knysh L. I. [Methodology for determining the composition and circuit design of solar photovoltaic equipments]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2008, no. 10 (57), pp. 100-104. (Rus)
22. Koltun M. M. *Optika i metrologiya solnechnykh elementov* [Optics and metrology of solar elements]. Moscow, Nauka, 1985, 280 p. (Rus)
23. Jim Toth. *PolySwitch PPTC device principals of operation* [Electronic resource], mode access: <http://studyres.com/doc/7802565/polyswitch-pptc-device-principals-of-operation?page=5>
24. Belykh S. [New innovative self-healing protection component for power lithium-ion accumulators]. *Components & Technologies*, 2011, no. 2, pp. 50-53. (Rus)