

УДК 621.316.8

ПРОБЛЕМИ НАДІЙНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ КОМПОНЕНТІВ СОЛЯЧНИХ БАТАРЕЙ

О.С. Тонкошкур, доктор фізико-математичних наук, професор,

Л.В. Накашидзе, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Дніпровський національний університет ім. О. Гончара
49005 м. Дніпро, пр-т Гагаріна, 72

Проаналізовані наявні уявлення про причини появи локальних областей з підвищеною температурою («гарячих плям») в панелях сонячних батарей та методи й засоби їхнього запобігання. Відмічені перспективи додаткових блокувальних елементів для ізоляції температурних і струмових перевантажень та перенапруг у фотоелектричних елементах та їхніх модулях на основі недорогих елементів сучасної функціональної електроніки, зокрема, самовідновлювальних запобіжників типу «Polyswith». Бібл. 20, рис. 3.

Ключові слова: фотоелектричні компоненти, сонячні батареї, відновлювальні джерела енергії.

PROBLEMS OF RELIABILITY OF PHOTOELECTRIC COMPONENTS OF SOLAR BATTERIES

O. Tonkoshkur, doctor of physical and mathematical sciences, professor,

L. Nakashidze, a candidate of technical sciences, senior scientist

Oles Honchar Dnipro National University
49005, 72 Gagarina Avenue, Dnipro

The existing ideas about the reasons for the appearance of local areas with high temperature («hot spots») in solar panels and methods and means of their prevention are analyzed. The prospects of additional blocking elements for the isolation of temperature and current overloads and overvoltage in photoelectric elements and their modules on the basis of inexpensive elements of modern functional electronics, in particular, self-healing fuses of the type «Polyswith» are marked. References 20, fig. 3.

Keywords: photovoltaic components, solar cells, renewable energy sources.



О.С. Тонкошкур
O. Tonkoshkur

Відомості про автора: доктор фізико-математичних наук, професор кафедри електронних розрахункових машин Дніпровського національного університету ім. О. Гончара.

Освіта: Дніпропетровський державний університет, фізичний факультет, спеціальність «Радіофізика та електроніка».

Наукова сфера: електроніка, схемотехніка та відновлювані джерела енергії.

Публікації: 260, в т. ч. 5 патентів.

ORCID: 0000-0002-1648-675X

Контакти: +38 (056) 373-12-63

e-mail: department@dnure.dp.ua

Information about the author: doctor of physics and mathematics sciences, professor of Electronic Computing Machinery Department Oles Honchar Dnipro National University.

Education: Dnipropetrovsk National University, Faculty of Physics with a degree in radio-physics and electronics.

Research area: electronics, circuit engineering, and renewable energy sources.

Publications: 260, including 5 patents.

ORCID: 000-0002-1648-675X

Contacts: +38 (056) 373-12-63

e-mail: department@dnure.dp.ua



Л.В. Накашидзе
L. Nakashidze

Відомості про автора: кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, директор НДІ енергетики Дніпровського національного університету ім. О. Гончара.

Освіта: Дніпропетровський хіміко-технологічний інститут, факультет технології неорганічних речовин, спеціальність «Технологія неорганічних речовин».

Наукова сфера: відновлювані джерела енергії.

Публікації: більше 120.

ORCID: 000-0003-3990-6718

Контакти: +38 (056) 373-12-78

e-mail: foton_dnu@ukr.net

Information about the author: candidate of technical sciences, research fellow, director of the Energy Research Institute Oles Honchar Dnipro National University.

Education: Dnipropetrovsk Institute of Chemical Technology, Faculty of Technology of inorganic compounds, with a degree in a technology of inorganic compounds.

Research area: the renewable and alternative energy sources.

Publications: more than 120.

ORCID: 000-0003-3990-6718

Contacts: +38 (056) 373-12-78

e-mail: foton_dnu@ukr.net

Перелік використаних позначень та скорочень:

D – обвідний діод;

$D_{\#2} \dots D_{\#N}$ – прямо зміщені р-n-переходи освітлених фото елементів;

$I_{ph\ i}$ – генерований фотострум фотоелементів;

I_{string} – надлишковий струм, що надходить з інших підпанелей;

M_A – польовий транзистор;

M_B – n-канальний транзистор;

M_{bip} – біполярний транзистор;

R_{sh} – шунтуючі опорти фотоелементів;

V_D – падіння напруги на прямо зміщеному обвідному діоді;

V_F – падіння напруги на прямо зміщеному р-n-переході освітленого фотоелемента;

$V_{R\ i}$ – падіння напруги на зворотно зміщеному р-n-переході затіненого фотоелемента;

MPPT – точки максимальної потужності;

СВЗ – самовідновлювальний запобіжник типу "Polyswath".

Вступ. Однією з невідкладних завдань підвищення ефективності експлуатації таких відновлюваних джерел енергії, як сонячні батареї, є пошук і розробка технологій захисту їхніх компонентів від електричних і теплових перевантажень з метою збільшення терміну служби і недопущення нештатних (зокрема пожежонебезпечних) ситуацій [1].

Як відомо, сонячні батареї є одним із найбільш перспективних відновлюваних джерел електроенергії. Вони містять десятки й сотні тисяч окремих фотоелектричних (ФЕ) елементів, з'єднаних паралельно-послідовно з метою забезпечення необхідних номіналів струму і напруги. Ідентичність їхніх електричних характеристик є одним із визначальних чинників забезпечення оптимального режиму функціонування і надійності таких багатокомпонентних систем.

Однак, прояв і створення різних дефектів у ФЕ елементах і їхніх з'єднаннях у процесі експлуатації, а також їхня робота в режимі мінливої неоднорідної освітленості, призводять до так званих послідовних і паралельних невідповідностей (відмінностей) між окремими елементами та їхніми групами [2–4]. Кожен з ФЕ

елементів поводить себе як незалежне джерело струму. Якщо з якої-небудь причини (зокрема через затінення) струм, що надається одним ФЕ елементом, нижчий за інші, то він працює в режимі зворотного зміщення і розсіює потужність. Через це, в підсумку, в компонентах сонячних батарей виникають локальні перегріву («гарячі плями») й інтенсифікуються процеси деградації [4].

У цій роботі проаналізовані уявлення про причини появи зазначених «гарячих плям» і сучасні методи й засоби їхнього запобігання.

1. Формування «гарячих плям», пов'язаних із внутрішньою структурою сонячних панелей. Як відомо, фотоелектричні модулі або панелі сонячних батарей складаються з послідовно пов'язаних ФЕ елементів. Зазвичай, вони організовані в підпанелі по 20 одиниць. Кожна підпанель обладнана обвідним діодом [5]. Якщо один або кілька ФЕ елементів затінені або несправні, вони зменшують генерований фотострум і, таким чином, переходять в режим зворотного зміщення, а обвідний діод гарантує альтернативний шлях струму, тим самим забезпечуючи роботу інших підпанелей [4] (рис. 1).

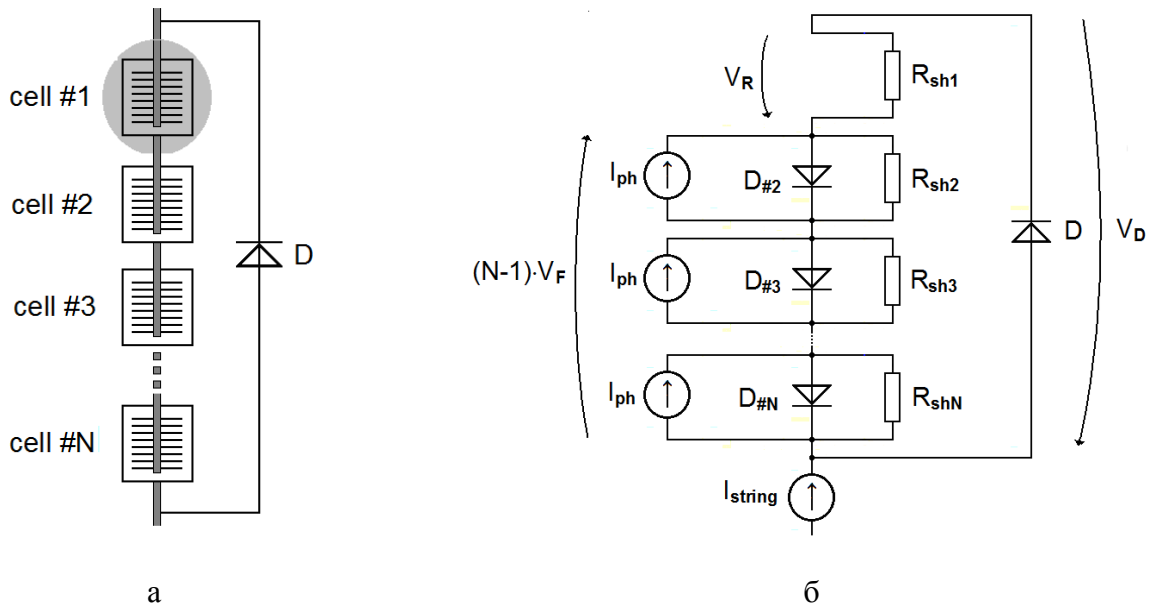


Рис. 1. Спрощені уявлення (а) і еквівалентна схема (б) окремої підпанелі. ФЕ елемент «cell #1» приймається повністю затіненим: D - обвідний діод; $D_{\#2} \dots D_{\#N}$ - прямо зміщені р-п-переходи освітлених ФЕ елементів; V_F , V_R і V_D - падіння напруги на прямо зміщеному р-п-переході освітленого ФЕ елемента, зворотно зміщеному р-п-переході затіненого ФЕ елемента («cell #1») і прямо зміщеному обвідному діодові D ; I_{ph} і R_{sh} - генерований фотострум і шунтуючі опори ФЕ елементів; I_{string} - надлишковий струм, що надходить з інших під панелей.

Fig. 1. Simplified representation (a) and equivalent scheme (b) of a separate subpanel. The solar cell “cell #1” is taken completely shaded.

Якщо струм, генерований ФЕ елементом «cell #1», менший за інші (на рис. 8 він прийнятий рівним нулю), надлишковий струм, що надходить з інших підпанелей I_{string} змушений проходити через обвідний діод D (в першому наближенні складова струму через R_{sh1} може не враховуватися, тобто можна прийняти $R_{sh1}=0$). Як наслідок, напруга на всій підпанелі збігається з падінням напруги V_D на прямо зміщеному обвідному діоді D .

Решта ФЕ елементів («cell #i», де $i = 2, 3, \dots N$) усередині підпанелі не можуть віддати свої згенеровані фотоструми в зовнішнє електричне коло, тому що їхнє послідовне з'єднання роз'єднане осередком «cell #1». Ці струми змушені проходити через відповідні внутрішні прямо зміщені діоди $D_{\#i}$, створюючи на кожному з них падіння напруги V_F . У результаті падіння напруги на послідовному з'єднанні освітлених ФЕ елементів дорівнює $(N-1) V_F$. Із закону Кіргофа випливає, що зворотна напруга на затіненому ФЕ елементі («cell #1») визначається як

$$V_R = (N-1) \times V_F + V_D.$$

Для надійної конструкції число N повинно бути вибрано досить невеликим, щоб запобігти перевищенню V_R над напругою пробою обернено зміщеного р-п-переходу затіненого ФЕ елемента. Якщо це не зроблено, ФЕ буде нагріватися через результуючі потужності розсіювання. Високі температури в локальних областях ФЕ елементів можуть призвести до появи «гарячих плям». Так, у випадку збільшення температури осередку може виникнути тепловий пробій р-п-переходу, коли величина зворотної напруги зменшується в міру збільшення струму і виникає її локальний тепловий дрейф в часі. При цьому формуються одномірні канали струму, що може призвести до внутрішніх температур у ФЕ, що значно перевищують 400°C . [6]. «Гарячі плями» можуть призвести до деградації і руйнації ФЕ елементів.

2. Методи запобігання появи «гарячих плям». На сьогодні основними напрямками розробки методів і засобів запобігання появи «гарячих плям» є такі:

- удосконалення відомих схемотехнічних технологій на основі обвідних діодів, які вклю-

чають в себе активні обвідні перемикачі;

- використання фотоелементів, які мають характеристики зворотного пробую 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 напрямках, що були досягнуті останнім часом.

2.1. Активні обвідні перемикачі. Обвідні діоди допомагають обмежити максимальну потужність, яка може розсіюватися, незважаючи на зворотно зміщений ФЕ елемент, але цей рівень потужності залежить від кількості таких елементів в рядку підпанелі. Серія рядків з великою кількістю ФЕ елементів буде розсіювати більше тепла, ніж рядки з меншою їхньою кількістю [7].

Таким чином, обвідні діоди більш ефективні в пом'якшенні «гарячих плям» для коротких довжин рядків ФЕ елементів. Наприклад, розміщення обвідних діодів над кожними двома елементами гарантує, що окремий ФЕ елемент ніколи не розсіює більше, ніж номінальна потужність двох таких елементів. Це рівень потужності, який навряд чи зашкодить окремий ФЕ елемент.

Раніше пропонувалися концепції додавання обвідних діодів в кожному осередку ФЕ і вбудовання обвідного діода в елемент. Однак додавання дискретних або вбудованих обвідних діодів на рівні окремих ФЕ елементів істотно збільшує вартість. У наземній фотоелектричній промисловості ця додаткова вартість є надто великою, так що окремі обвідні діоди, як правило, не були реалізовані і навряд чи будуть прийняті в найближчому майбутньому. Таким чином, необхідні інші недорогі і практичні методи запобігання «гарячим плямам» [6].

У [8, 9] запропоновані активні комутаційні рішення, які також скорочують підрядок (підпанель) ФЕ елементів при її обході. Підхід активного обвідного перемикача зменшує напругу і втрати потужності в лінії ФЕ елементів в ситуації струмового обводу і цим зменшує ймовірність появи «гарячих плям».

На рис. 2 зображений варіант такої активної системи обводу, запропонований в [9]. Як видно, схема містить:

- біполярний транзистор M_{bip} , який діє як обхідний компонент, пропонуючи альтернативний шлях для струму I_{bypass} , коли субпанель частково затінена;
- два n-канальних МОН-транзистора, позначені M_A і M_B , які призначені для автоматичного включення біполярного транзистора M_{bip} в разі затінення, а також для його неактивності, коли підпанель піддається впливу сонячного світла;
- додатковий діод, щоб частково підтримувати біполярний транзистор або повністю витримувати обвідний струм, якщо підпанель зламана або піддана ідеально темним умовам (струм $I_{shadow} = 0$).

Основну поведінку запропонованої схеми можна пояснити таким чином. Із рис. 2 випливає, що електрична напруга, створювана підпанеллю $V_{subpanel} = V_{GSA}$, і падіння напруги, що викликається її струмом ($I_{subpanel}$), $V_{DSA} = V_{GSB}$.

Якщо підпанель освітлюється, висока (позитивна) напруга $V_{subpanel}$ приводить польовий транзистор M_A в лінійний режим (збагачений носіями заряду канал). Отже, напруга між його стоком і витоком V_{DSA} набагато нижча ніж порогова напруга V_{THB} транзистора M_B . Останній знаходиться в 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 $V_{DSA} > V_{THB}$ 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 елементів всередині підпанелі.

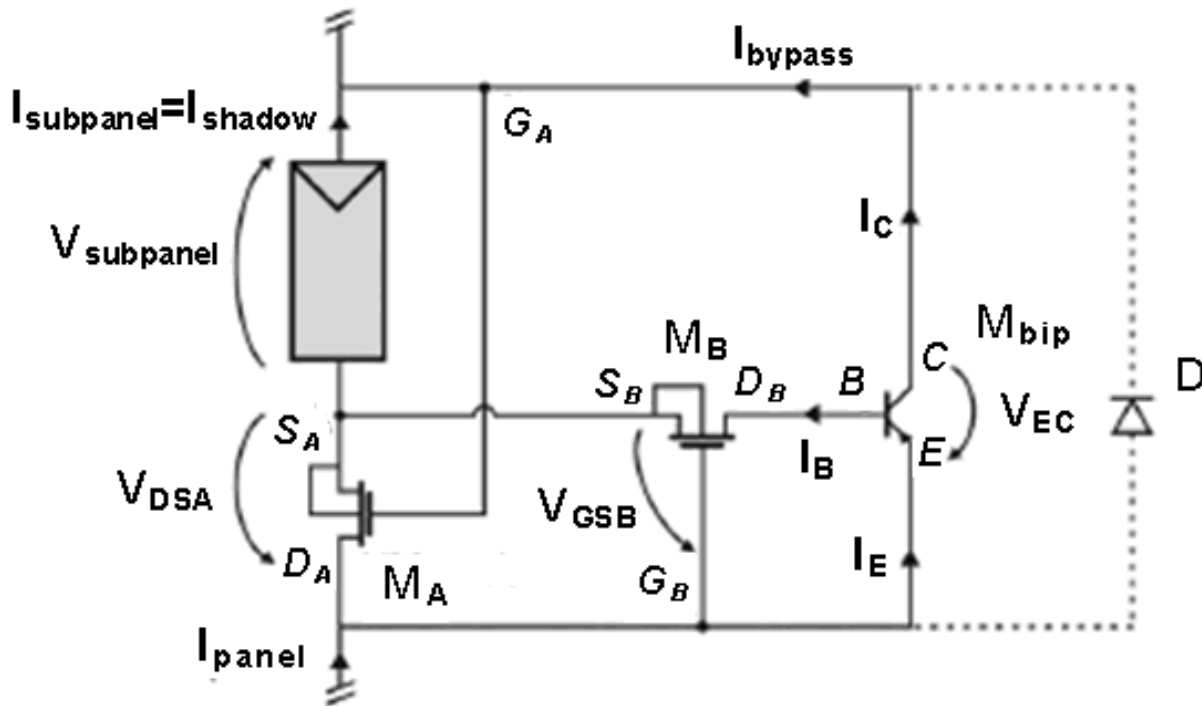


Рис. 2. Схема активного обвідного перемикача на основі транзисторів.

Fig. 2. Scheme of the active transverse oscillator switch.

При більш повному затіненні підпанелі вона виступає як навантаження (або її частина) по відношенню до інших незатінених підпанелей (з'єднаних послідовно у відповідній панелі) і прикладена до неї напруга зворотня по відношенню до напруги $V_{subpanel}$ при освітленні. У результаті $I_{shadow}=0$, обидва польових транзистори закриваються (так як, якщо $I_{shadow}=0$, то і $I_{DA}=I_{DB}=0$) і працює додатковий обвідний діод D , який буде повністю проводити струм ФЕ елементів I_{panel} , що належать іншим підпанелям.

2.2. Фотоелектричні елементи з низьким опором зворотного пробою. Такі ФЕ елементи виявляють максимальну потужність розсіювання при повному затіненні. Відомо, що потужність розсіювання пропорційна напрузі пробою. Таким чином, зниження величини пробивної напруги також знижує максимально можливу потужність, що розсіюється в осередку ФЕ елемента. Проте, ФЕ елементи з низькими характеристиками зворотного пробою також стають зворотними зміщеними і розсіюють тепло. Цей підхід ефективний тільки в тому випадку, якщо осередок ФЕ елемента розсіює тепло, не викликаючи пошкоджень.

Попередні дослідження в [6] свідчать про те, що втрати розсіювання, в 3 рази більші ніж в точці максимальної потужності (MPP) ФЕ елемента і потенційно можуть його пошкодити. Таким чином, необхідні подальші дослідження в цьому напрямку на ФЕ елементах з малими величинами напруги пробою, щоб визначити їхню сприйнятливості до «гарячих точок».

2.3. Методи виявлення та активного захисту. На сьогодні можна виділити два напрямки в розробці захисту від «гарячих плям» на рівні окремого фотоелектричного модуля (сонячної панелі), які базуються на застосуванні методів відстеження точки максимальної потужності MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Перший з них зводить задачу захисту до оптимізації режимів роботи окремих частин сонячних батарей. Як приклад такого підходу можна вказати наведені в [10] 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 більшої

поверхні однієї комірки, ніж під час використання центрального МРРТ.

Інший напрямок ставить завдання запобігання виникненню «гарячих плям» шляхом моніторингу послідовного з'єднання сонячних панелей під час роботи. Це повинно дозволити вчасно визначити і активно захистити їхній рядок при виявленні в ній стану «гарячого плями» [6].

Для виявлення гарячих плям була запропонована концепція, на основі використання змін параметрів імпедансу [11] або параметрів вольтамперної характеристики [12] рядка ФЕМ при частковому затіненні окремих його модулів. Алгоритми виявлення «гарячого плями» можуть працювати в тандемі з контролем МРРТ, періодично перериваючи МРРТ для вимірювання імпедансу або інших електричних

параметрів рядка фотоелектричних модулів (панелей).

Коли виявлений підрядок, що містить неузгоджений осередок (наприклад, окрему сонячну панель), гарантованим методом запобігання «гарячої плями» є його відключення, тому що в цьому випадку струм через його осередки не проходить. У зв'язку з цим прийнята перспективною концепція захисту рядків панелей фотогальванічних елементів від гарячих плям шляхом їхнього відключення [6, 13,14].

Блок-схема одного з варіантів реалізації такого захисту, де є система діагностики і моніторингу окремої сонячної панелі та засоби, що дозволяють виключати її з рядка, якщо вона є неузгодженою (наприклад, затіненою) [13], представлена на рис. 3.

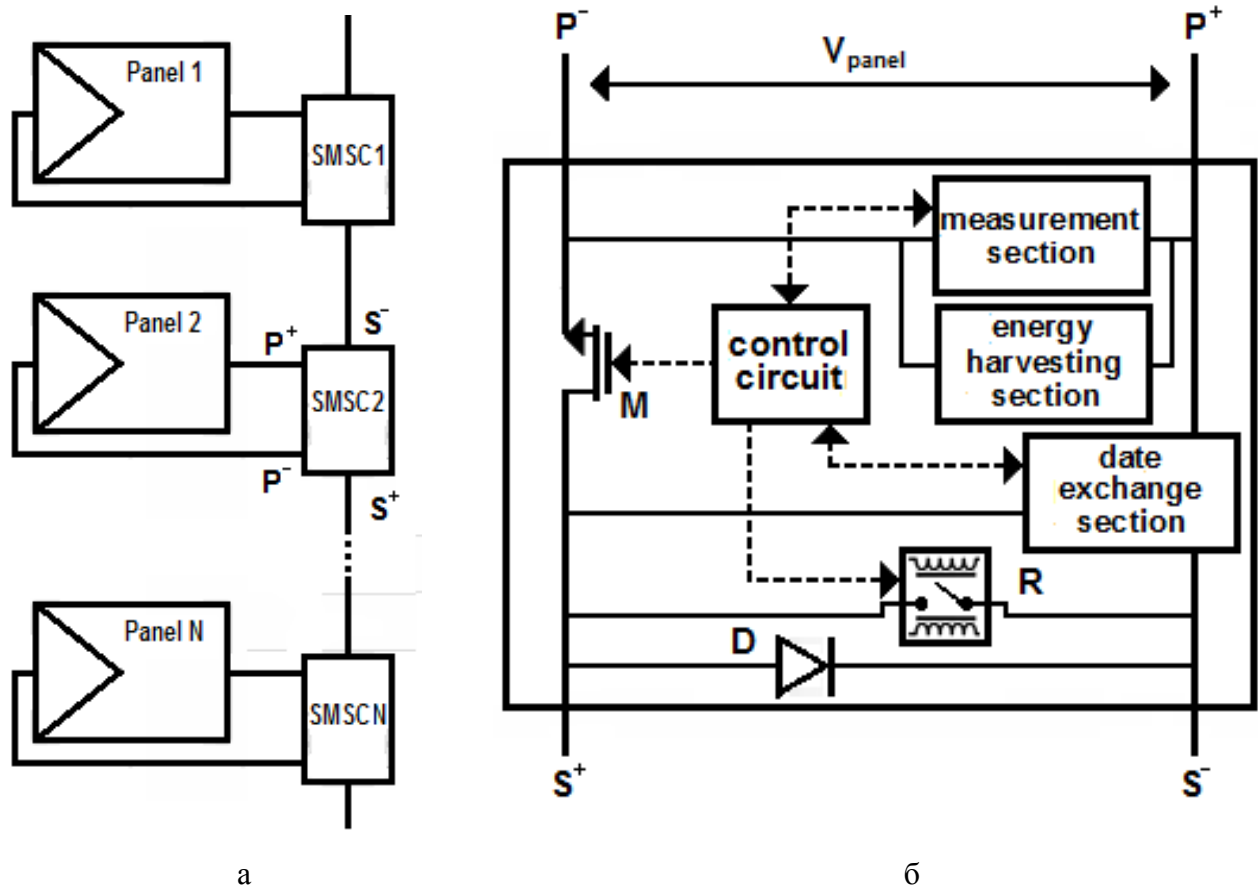


Рис. 3. Схема включення пристроїв захисту фотоелектричних модулів (сонячних панелей) в їхньому рядку (а) і блок схема одного з них (б).

Fig. 3. Scheme of inclusion of protection devices for photovoltaic modules (solar panels) in their line (a) and block diagram of one of them (b).

Як видно, цей пристрій захисту окремого фотоелектричного модуля SMSC (a single module safety circuit) складається з таких секцій: вимірювальної [measurement section], енергозабезпечення [energy harvesting section] та обміну даними [data exchange section]. Пристрій також містить обвідний діод D , що відключає панель, польовий транзистор M , біполярне електромеханічне реле для закорочування зовнішніх виводів панелі в нештатних ситуаціях і контролюючу схему керування [control circuit], що використовує мікроконтролер для забезпечення загальної синхронізації і включення.

Клеми сонячної панелі P^+ та P^- фізично відокремлені від вихідних клем (S^+ та S^-), які використовуються для послідовного підключення сонячних панелей одну до одної. 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, так як його секція енергозабезпечення безпосередньо підключена до «внутрішніх» клем P^+ і P^- . Це дозволяє завжди забезпечувати позитивну напругу V_{panel} , яка дорівнює напрузі незамкненого кола V_{oc} відключеної сонячної панелі. В іншому випадку воно дорівнює її робочій напрузі. Як наслідок – схема завжди керована, і панель сонячних батарей може бути в кінцевому підсумку підключена відкриттям реле і керована транзистором M у ввімкненому стані.

Обвідний діод D допускає безперервний струм рядка з панелей незалежно від стану транзистора M , тобто безперервна потужність, що подається з рядка, гарантується, навіть коли окрема її сонячна панель відключена.

Коли транзистор M вимкнений, вимірювальна секція працює на ізольованій окремій панелі. Виміряні нею величини (напруга розімкнутого контуру і струм короткого замикання) не залежать від робочої точки інших панелей рядка і можуть, таким чином, використовуватися для індивідуальної характеристики стану окремої панелі. Коли транзистор M увімкнений, контролюється контрольна точка сонячної панелі і реєструється фактичне виробництво нею електроенергії.

Секція обміну даними під час нормальної роботи контролює їхній трафік для цілей конфігурації або діагностики. У разі нештатної ситуації вона розпізнає конкретне кодифіковане слово і 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 [12,15], де виміряні дані (робочі напруги і струми) передавалися в центральний блок за допомогою бездротових протоколів [15] або на основі ліній електропередач PLC [12,16]. У цьому варіанті використана спеціальна комунікаційна PLC схема, яка використовує шину постійного струму з'єднання сонячних панелей. Проблеми усунення спотворень сигналів даних, що виникають при їхньому переміщенні сонячними батареями, вирішуються шляхом використання обхідних високочастотних фільтрів, паралельно підключених до кожної сонячної панелі батареї [13,17].

3. Перспективи підвищення ефективності схемотехнічних методів захисту від електротеплових перевантажень. Існує два способи запобігання появі «гарячих плям»: 1) переконатися, що осередок може повністю розсіяти потужність найгіршого випадку, не пошкоджуючи осередок, або 2) розімкнути електричне коло фотоелектричних елементів. «Гаряча пляма» може призвести до вторинного руйнування або пошкодження елементів інкапсулятора і постійної деградації сонячних панелей або до проблем безпеки.

Використання ФЕ елементів з низькими напругами зворотного пробою обмежують потужність, що розсіюється під час розігріву локальних областей ФЕ елемента в процесі утворення «гарячої плями», і можуть бути ефективним способом її запобігання, якщо при цьому величина цієї потужності розсіювання недостатня для пошкодження фотоелектричного осередку.

Найвні на сьогодні результати моделювання та експериментальні дані свідчать, що обвідні діоди в підпанельних рядках фотоелектричних елементів не повністю захищають від появи «гарячих плям». Обвідні діоди більш ефективні для запобігання «гарячих плям» при дуже коротких довжинах рядків ФЕ елементів, але це звичайно не застосовується в сучасній конструкції панелей.

Активні обвідні перемикачі є поліпшенням порівняно з обвідним діодом, але це вимагає ускладнення схемних рішень і значних витрат.

Методи виявлення «гарячої плями» на основі вимірів електричних параметрів сонячних панелей у поєднанні з активним захистом за способом розімкненого електричного контуру більш ефективно гарантує від їхнього виникнення. Однак такі технології вимагають складного спеціального обладнання, з одного боку, і повинні бути розроблені тільки на рівні фотоелектричних модулів.

Одним із перспективних напрямків використання додаткових блокувальних елементів для ізоляції тимчасових температурних і струмових перевантажень і перенапруг на ФЕ елементах є використання менш дорогих елементів функціональної електроніки, зокрема відносно нових самовідновлювальних запобіжників (СВЗ) типу «Polyswith», які вже набули широкого поширення [18]. Такими СВЗ є полімерні композити з нанорозмірними вуглецевими наповнювачами. Базове функціональне властивість СВЗ – стрибкоподібне збільшення електричного опору після досягнення деякої граничної температури на кілька порядків і повернення в початковий високопровідний стан після зниження температури [19].

Ці елементи електричного і теплового захисту вже знайшли застосування в акумуляторах і гальванічних джерелах живлення [20]. До їхніх переваг слід віднести:

- близький до металевого опір до температури перемикачання і до опору ізолятора вище зазначеної температури;
- реалізація у вигляді дискретних елементів і безперервних плівок – стрічок (тобто можливість реалізації ізоляції дефектної локальної області окремого ФЕ елемента);
- реакція у формі тимчасового блокування окремих компонентів сонячної батареї як на підвищення температури, так і на зростання густини струму.

Проведені останнім часом експериментальні дослідження дозволили встановити, що такі елементи захисту не впливають на роботу сонячних батарей в їхньому робочому діапазоні температур і функціонально придатні для електричної ізоля-

ції локальних областей і компонентів сонячних батарей з підвищеною температурою.

1. Köntges M. Review of failures of photovoltaic modules. IEA PVPS Task 13 / M. Köntges, S. Kurtz, C. Packard, U. Jahn, K.A. Berger, K. Kato, T. Friesen, H. Liu, M. Van Iseghem. – 2014. – 132 p.
2. Tonkoshkur A.S. Schemotechnical technologies for reliability of solar arrays / A.S. Tonkoshkur, L.V. Nakashidze., S.F. Lyagushyn // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Вип. 4(117). – Дніпро, 2018. – С. 95–107.
3. Ramabadran R. Effect of shading on series and parallel connected solar PV modules / R. Ramabadran, B. Mathur // Modern Applied Science. – 2009. – Vol. 3, No 10. – P. 32–41.
4. Daliento S. A modified bypass circuit for improved hot spot reliability of solar panels subject to partial shading. / S. Daliento, F. Di Napoli, P. Guerriero, V.d'Alessandro // Solar Energy. – 2016. – Vol. 134 (September). – P. 211–218.
5. Silvestre S. Study of bypass diodes configuration on PV modules / S. Silvestre, A. Boronat, A. Chouder // Appl. Energy. – 2009. – Vol. 86, Iss. 9. – P. 1632–1640.
6. Kim K.A. Reexamination of photovoltaic hot spotting to show inadequacy of the bypass diode / K.A. Kim, P.T. Krein // IEEE J. Photovoltaics. – 2015. – Vol. 5, Iss. 5. – P. 1435–1441.
7. Kim K.A. Photovoltaic hot spot analysis for cells with various reverse-bias characteristics through electrical and thermal simulation / K.A. Kim, P.T. Krein // Proc. IEEE Workshop Control Modeling Power Electron. – 2013. – P. 1–8.
8. Acciari G. Higher PV module efficiency by a novel CBS bypass / G. Acciari, D. Graci, A.L. Scala // IEEE Trans. Power Electron. – 2011. – Vol. 26, No. 5. – P. 1333–1336.
9. d'Alessandro V. A simple bipolar transistor-based bypass approach for photovoltaic modules / V. d'Alessandro, P. Guerriero, and S. Daliento // IEEE J. Photovoltaics. – 2014. – Vol. 4, No. 1. – P. 405–413.
10. Solórzano J. Hot-spot mitigation in PV arrays with distributed MPPT (DMPPT) / J. Solórzano, M.A. Egido // Solar Energy. – 2014. – Vol. 101 (March). – P. 131–137.
11. Kim K.A. Photovoltaic ac parameter characterization for dynamic partial shading and hot spot detection / K.A. Kim, P.T. Krein, G.-S. Seo, B.-H. Cho // Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. – 2013. – P. 109–115.
12. Sánchez-Pacheco F.J. Photovoltaic systems distributed monitoring for performance optimization. / F.J. Sánchez-Pacheco. – Doct. Thesis. Universidad de Málaga (RIUMA: riuma.uma.es). Málaga, España. – 2015.
13. Di Napoli F. Single panel voltage zeroing system for safe access on PV plants / F. Di Napoli, G. Guerriero, V. d'Alessandro, S. Daliento // IEEE J. Photovoltaics. – 2015. – Vol. 5, No. 5. – P. 1428–1434.
14. Schmidt H. Bypass and protection circuit for a solar module and method of controlling a solar module / H. Schmidt, W. Roth // U.S. Patent US20 120 194 003 A1, Aug. 2, 2012.

15. Resadi M. Control and signalling device for photovoltaic modules / M. Resadi, S. Costa, M. Cesana // Eur. Patent Appl. EP2 159 766 A1, 2010.

16. Sanchez-Pacheco F.J. PLC-Based PV plants smart monitoring system: field measurements and uncertainty estimation / F.J. Sanchez-Pacheco, P.J. Sotorrio-Ruiz, J.R. Heredia-Larrubia, F. Perez-Hidalgo, M. Sidrach De Cardona // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2014. – Vol. 63, No. 9. – P. 2215–2222.

17. Di Napoli F. A power line communication on DC bus with photovoltaic strings/ F. Di Napoli, P. Guerriero, V. d'Alessandro, S. Daliento // Proc. Renewable Power Gener. Conf. – 2014. – P. 1–6.

18. Тонкошкур А.С. Применение самовосстанавливающихся элементов для электрической защиты солнечных батарей / А.С. Тонкошкур, А.В. Иванченко, Л.В. Накашидзе, С.В. Мазурик // Технология и конструирование электронной аппаратуры. – 2018. – №1. – С. 43–49.

19. Гавриков В. Самовосстанавливающиеся РТС-предохранители для защиты от токовых перегрузок / В. Гавриков // Новости Электроники. – 2014. – №12. – С.11–15.

20. Oglesbee J.W. Overcharge protection device and methods for lithium based rechargeable batteries / J.W. Oglesbee, A.G. Burns // US Patent 6,608,470 B1 – 2003.

ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

А.С. Тонкошкур, доктор физико-математических наук, профессор, **Л.В. Накашидзе**, кандидат технических наук

Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара
49005 г. Днепр, пр-т Гагарина, 72

Проанализированы имеющиеся представления о причинах появления локальных областей с повышенной температурой («горячих пятен») в панелях солнечных батарей и методы и средства их предотвращения. Отмечены перспективы дополнительных блокирующих элементов для изоляции температурных и токовых перегрузок и перенапряжений в фотоэлектрических элементах и их модулях на основе недорогих элементов современной функциональной электроники, в частности, самовосстанавливающихся предохранителей типа «Polyswith». Библ. 20, рис. 3.

Ключевые слова: фотоэлектрические компоненты, солнечные батареи, возобновляемые источники энергии.

REFERENCES

1. Köntges M. Review of failures of photovoltaic modules. IEA PVPS Task 13 / M. Köntges, S. Kurtz, C. Packard, U. Jahn, K.A. Berger, K. Kato, T. Friesen, H. Liu, M. Van Iseghem. – 2014. – 132 p.

2. Tonkoshkur A.S. Schemotechnical technologies for reliability of solar arrays / A.S. Tonkoshkur, L.V. Nakashidze., S.F. Lyagushyn // System technology. Regional interuniversity collection of scientific works. – Vol. 4 (117). – Dnipro, 2018. – P. 95–107.

3. Ramabadran R. Effect of shading on series and parallel connected solar PV modules / R. Ramabadran, B. Mathur // Modern Applied Science. – 2009. – Vol. 3, No 10. – P. 32–41.

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

5. Silvestre S. Study of bypass diodes configuration on PV modules / S. Silvestre, A. Boronat, A. Chouder // Appl. Energy. – 2009. – Vol. 86, Iss. 9. – P. 1632–1640.

6. Kim K.A. Reexamination of photovoltaic hot spotting to show inadequacy of the bypass diode / K.A. Kim, P.T. Krein // IEEE J. Photovoltaics. – 2015. – Vol. 5, Iss. 5. – P. 1435–1441.

7. Kim K.A. Photovoltaic hot spot analysis for cells with various reverse-bias characteristics through electrical and thermal simulation / K.A. Kim, P.T. Krein // Proc. IEEE Workshop Control Modeling Power Electron. – 2013. – P. 1–8.

8. Acciari G. Higher PV module efficiency by a novel CBS bypass / G. Acciari, D. Graci, A.L. Scala // IEEE Trans. Power Electron. – 2011. – Vol. 26, No. 5. – P. 1333–1336.

9. d'Alessandro V. A simple bipolar transistor-based bypass approach for photovoltaic modules / V. d'Alessandro, P. Guerriero, and S. Daliento // IEEE J. Photovoltaics. – 2014. – Vol. 4, No. 1. – P. 405–413.

10. Solórzano J. Hot-spot mitigation in PV arrays with distributed MPPT (DMPPT) / J. Solórzano, M.A. Egido // Solar Energy. – 2014. – Vol. 101 (March). – P. 131–137.

11. Kim K.A. Photovoltaic ac parameter characterization for dynamic partial shading and hot spot detection / K.A. Kim, P.T. Krein, G.-S. Seo, B.-H. Cho // Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. – 2013. – P. 109–115.

12. Sánchez-Pacheco F.J. Photovoltaic systems distributed monitoring for performance optimization. / F.J. Sánchez-Pacheco. – Doct. Thesis. Universidad de Málaga (RIUMA: riuma.uma.es). Málaga, España. – 2015.

13. Di Napoli F. Single panel voltage zeroing system for safe access on PV plants / F. Di Napoli, G. Guerriero, V. d'Alessandro, S. Daliento // IEEE J. Photovoltaics. – 2015. – Vol. 5, No. 5. – P. 1428–1434.

14. Schmidt H. Bypass and protection circuit for a solar module and method of controlling a solar module / H. Schmidt, W. Roth // U.S. Patent US20 120 194 003 A1, Aug. 2, 2012.

15. Resadi M. Control and signalling device for photovoltaic modules / M. Resadi, S. Costa, M. Cesana // Eur. Patent Appl. EP2 159 766 A1, 2010.

16. Sanchez-Pacheco F.J. PLC-Based PV plants smart monitoring system: field measurements and uncertainty estimation / F.J. Sanchez-Pacheco, P.J. Sotorrio-Ruiz, J.R. Heredia-Larrubia, F. Perez-Hidalgo, M. Sidrach De Cardona // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2014. – Vol. 63, No. 9. – P. 2215–2222.

17. Di Napoli F. A power line communication on DC bus with photovoltaic strings/ F. Di Napoli, P. Guerriero, V. d'Alessandro, S. Daliento // Proc. Renewable Power Gener. Conf. – 2014. – P. 1–6.

18. Tonkoshkur A.S. Application of self-repairing elements for electric protection of solar batteries / A.C. Tonkoshkur, A.V. Ivanchenko, L.V. Nakashidze, S.V. Mazurik // *Technology and Constriction of Electronic Equipment*. – 2018. – No.1. – P. 43–49.

19. Gavrikov V. Self-healing PTC-fuses for protection against current overloads / V. Gavrikov / *Electronics news*. – 2014. – No.12. – P. 11–15.

20. Oglesbee J.W. Overcharge protection device and methods for lithium based rechargeable batteries / J.W. Oglesbee, A.G. Burns // *US Patent 6,608,470 B1* – 2003.

SYNOPSIS

One of the urgent tasks of increasing the efficiency and reliability of renewable energy sources such as solar cells is to seek and develop technologies for protecting their components from electrical and thermal overloads in order to increase service life and prevent unusual (in particular fire) situations.

In this paper, the understanding of the causes of these «hot spots» and modern methods and means of their prevention are analyzed.

In the article, the mechanism of formation of «hot spots», connected with the internal structure of solar panels is considered. «Hot spots» with or without thermal breakdown can lead to degradation and destruction of FE elements.

The analysis of methods for preventing the appearance of «hot spots» has been carried out. Today, the main areas of development of methods and means of preventing the appearance of «hot spots» are the following:

- improvement of well-known circuit-based technologies based on by-pass diodes, which include active bypass switches;
- use of photocells that have characteristics of a return test with low voltage amplitude or protection from open loop;
- detection and active protection based on technologies for tracking the point of maximum power of solar cells.

A thorough analysis of the main research results in these areas, which has been achieved recently, has been carried out.

The prospect of application of elements of functional electronics, in particular, polymeric self-repairing safety fuses of the «Polyswith» type, is solved for the purpose of increasing the reliability of the devices for a transformation of solar radiation energy. Recent experimental studies have made it possible to establish that such security elements do not affect the operation

of solar cells in their operating temperature range and are functionally suitable for the electrical isolation of local areas and components of high-temperature solar cells.

РЕФЕРАТ

Одним із невідкладних завдань підвищення ефективності та надійності таких відновлюваних джерел енергії як сонячні батареї є пошук і розробка технологій захисту їхніх компонентів від електричних і теплових перевантажень з метою збільшення терміну служби і недопущення нештатних (зокрема пожежонебезпечних) ситуацій.

У цій роботі проаналізовані уявлення про причини появи зазначених «гарячих плям» і сучасні методи й засоби їхнього запобігання.

В статті розглянуто механізм формування «гарячих плям», пов'язаних з внутрішньою структурою сонячних панелей. «Гарячі плями» з тепловим пробоем або без нього можуть призвести до деградації і руйнації ФЕ елементів.

Проведено аналіз методів запобігання появи «гарячих плям». На сьогодні основними напрямками розробки методів і засобів запобігання появи «гарячих плям» є такі:

- удосконалення відомих схемотехнічних технологій на основі обвідних діодів, які містять активні обвідні перемикачі;
- використання фотоелементів, які мають характеристики зворотного пробую з малою амплітудою напруги або захистом від розімкнутого контуру;
- виявлення й активний захист, – які базуються на технологіях відстеження точки максимальної потужності компонентів сонячних батарей.

Проведено ґрунтовний аналіз основних результатів досліджень в зазначених напрямках, що були досягнуті останнім часом.

Відмічена перспективність застосування елементів функціональної електроніки, зокрема полімерних самовідновлювальних запобіжників типу «Polyswith» для розв'язання завдання підвищення надійності пристроїв перетворення енергії сонячного випромінювання. Проведені останнім часом експериментальні дослідження дозволили встановити, що такі елементи захисту не впливають на роботу сонячних батарей в їхньому робочому діапазоні температур, і функціонально придатні для електричної ізоляції локальних областей і компонентів сонячних батарей з підвищеною температурою.

Стаття надійшла до редакції 23.05.18

Остаточна версія 10.09.18