

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКА В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ «POLYSWITCH»

**Тонкошкур А. С.** – д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры электронных вычислительных машин, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Украина.

**Накашидзе Л. В.** – канд. техн. наук, старш. научн. сотр., директор НИИ энергетики Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Украина.

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Решение задачи повышения надежности солнечных батарей, включая устранение нештатных (пожароопасных) ситуаций на основе разработки методов и средств предотвращения токовых перегрузок в их фотоэлектрических системах.

**Цель.** Изучение перспективы минимизации токовых перегрузок в фотоэлектрических системах солнечных батарей путем применения недорогостоящих элементов функциональной электроники, в частности, относительно новых и, получивших широкое распространение, самовосстанавливающихся предохранителей типа «Polyswitch».

**Метод.** Предложено схемное решение и методом моделирования обоснованы возможности использования предохранителей типа Polyswitch для предотвращения и минимизации токовых перегрузок в фотоэлектрических системах солнечных батарей.

**Результаты.** Проанализировано влияние величины сопротивления в проводящем состоянии и тока срабатывания предохранителей на вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики параллельных соединений фотоэлектрических преобразователей и их модулей.

**Выводы.** Показано, что эффективное ограничение тока при наличии короткого замыкания при таком соединении фотоэлектрических компонент может быть реализовано при выполнении следующих условий:

- сопротивление предохранителя в проводящем состоянии значительно меньше параллельного соединения последовательных сопротивлений фотоэлектрических компонент;
- ток срабатывания предохранителя должен быть больше тока короткого замыкания отдельного фотоэлектрического компонента и меньше тока их параллельного соединения.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** фотоэлектрический преобразователь, токовые перегрузки, самовосстанавливающиеся предохранители, вольт-амперные характеристики, вольт-ваттные характеристики, моделирование.

### АББРЕВИАТУРЫ

ВАХ – вольт-амперные характеристики;

ВВХ – вольт-ваттные характеристики;

СВП – самовосстанавливающиеся предохранители;

ФЭМ – фотоэлектрический модуль;

ФЭП – фотоэлектрический преобразователь.

### НОМЕНКЛАТУРА

$A$  – диодный коэффициент;

$F_u$  – самовосстанавливающийся предохранитель;

$I$  – ток, отдаваемый во внешнюю электрическую цепь;

$i_0$  – обратный ток диода;

$I_{Fu}$  – ток СВП в проводящем состоянии;

$I_L$  – ток резистора нагрузки;

$i_{ph}$  – величина фототока ФЭП;

$i_{sc}$  – ток короткого замыкания ФЭП;

$I_{sc}$  – ток короткого замыкания ФЭМ;

$I_{trip}$  – ток срабатывания (перехода в изолирующее – состояние) СВП;

$k$  – постоянная Больцмана;

$m$  – число последовательно соединенных ФЭП в модуле;

$n$  – число параллельно соединенных ФЭМ в фотоэлектрической системе;

$PV$  – фотоэлектрический компонент;

$q$  – заряд электрона;

$R_{1max}$  – минимальное сопротивление СВП после одного часа восстановления при заданной температуре окружающего воздуха;

$R_{Fu}$  – сопротивление СВП в проводящем состоянии;

$r_L$  – сопротивление нагрузки;

$R_L$  – резистор нагрузки;

$R_{min}$  – максимально возможное минимальное начальное сопротивление СВП;

$r_s$  – последовательное сопротивление ФЭП;

$R_s$  – эквивалентное последовательное сопротивление ФЭМ;

$r_{sh}$  – шунтовое сопротивление ФЭП;

$U_T$  – эквивалентное термальное напряжение;

$V$  – выходное напряжение;

$V_{oc}$  – напряжение холостого хода;

$T$  – абсолютная температура;

$v$  – выходное напряжение ФЭП.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее нежелательных источников ненадежности фотоэлектрических компонентов солнечных батарей являются токовые перегрузки и возникновение перегревов, включая замыкания непосредственно в них, а также короткие замыкания между их соединительными контактами [1–3]. Физическими причинами таких ситуаций могут быть повреждение коррозией в процессе эксплуатации составляющих их элементов, «скрытые» производственные дефекты, неисправные блокирующие и обводные диоды или результаты деградации изоляции под действием окружающей среды [2].

Особое значение это имеет для ФЭМ на основе тонкопленочного кремния, где имеет место образование шунтов как «скрытых» дефектов при производстве, так и из-за обратного смещения ячеек, вызванного затенением модулей или отдельных ФЭП солнечной батареи в процессе ее эксплуатации. Это усугубляется тем, что для тонкопленочных модулей превентивные меры с использованием обводных диодов могут быть невозможными для ограничения обратного напряжения на неактивных ФЭП [1].

Наиболее неблагоприятные последствия возникновения указанных коротких замыканий имеют место в параллельных соединениях фотоэлектрических элементов. В этом случае они приводят к выходу из строя всего соединения и возникновению существенных перегревов из-за значительных токов, создаваемых суммированием токов отдельных таких элементов. В итоге это может привести к нештатным (пожароопасным) ситуациям. Устранение или минимизация влияния указанного фактора на работу солнечных батарей представляется наиболее необходимым условием для более широкого использования параллельных соединений при формировании модулей и панелей солнечных батарей.

Следует отметить, что в настоящее время разработке методов и средств предотвращения появления локальных перегревов («горячих пятен») в фотоэлектрических компонентах солнечных батарей уделяется значительное внимание. В частности, известны решения такой задачи как: использование ФЭП с низкими напряжениями обратного пробоя [4]; включение в фотоэлектрическую систему дополнительных элементов: обводных диодов и активных обводных переключателей [3, 5–7]; методы и технические средства, основанные на обнаружении «горячего пятна» на основе измерений электрических параметров солнечных панелей в сочетании с активной защитой по способу разомкнутого контура [8, 9].

Тем не менее, они не являются универсальными. Использование ФЭП с низким напряжением обратного пробоя ограничивает мощность, рассеиваемую во время разогрева его локальных областей, но может быть эффективным способом предотвращения «горячего пятна», если величина рассеиваемой мощности недостаточна для повреждения ФЭП.

Имеющиеся на настоящий момент результаты моделирования и экспериментальные данные свидетельствуют, что обводные диоды в подпанельных строках фотоэлектрических элементов не полностью защищают от появления «горячих пятен». Обводные диоды более эффективны для предотвращения «горячих пятен» при очень коротких длинах строк ФЭП, что не применяется в современной конструкции панелей из экономических соображений. Активные обводные переключатели, как и технические средства, основанные на обнаружении «горячих пятен», являются улучшением по сравнению с обводным диодом, но требуют усложнения схемных решений и затрат [5].

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

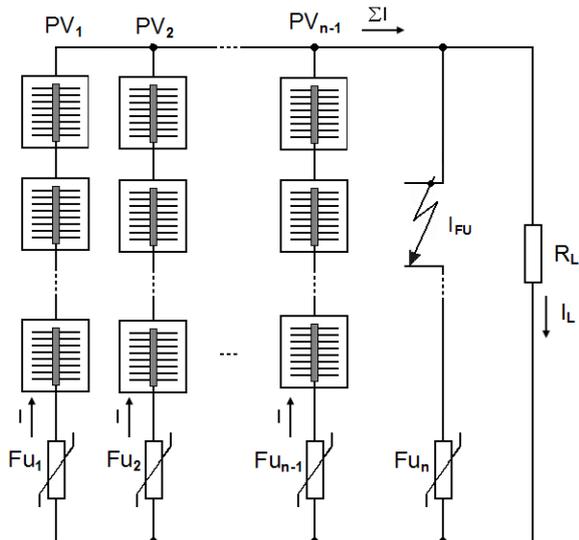
Одним из перспективных направлений решения рассматриваемой задачи является применение для изоляции неактивных (затененных или дефектных) областей как отдельных ФЭП, так и их модулей, менее дорогостоящих элементов функциональной электроники, в частности, относительно новых и, получивших широкое распространение, СВП типа «Polyswith» [3, 10]. Эти элементы электрической и тепловой защиты уже нашли применение в аккумуляторах и гальванических источниках питания [11–14]. Необходимым этапом этого представляется разработка и моделирование функционирования схемных решений для фотоэлектрических компонентов, использующих указанные самовосстанавливающиеся предохранители.

В данной работе предложена модель и проанализированы возможности использования самовосстанавливающихся предохранителей типа Polyswitch для предотвращения и минимизации токовых перегрузок в параллельных соединениях фотоэлектрических преобразователей и их модулей.

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Как уже указывалось, короткие замыкания являются наиболее нежелательными в параллельных соединениях как ФЭП та их последовательных соединений ФЭМ. Из рис. 1 видно, что короткое замыкание одного компонента  $PV_n$  в отсутствие СВП ведет к потере всей параллельной цепи, содержащей другие исправные компоненты.

Наличие самовосстанавливающихся предохранителей  $Fu_i$ , соединенных последовательно с каждым фотогенерирующим компонентом  $PV_i$ , позволяет сохранить и эксплуатировать исправные при наличии короткого замыкания в одном из них. Математическая модель, позволяющая проанализировать рассматриваемый эффект ограничения тока при коротком замыкании и определить наиболее эффективные режимы такой защиты, включает в себя решение задачи выбора эквивалентных схем, описывающих ФЭП и ФЭМ, аппроксимации полевой зависимости электрического сопротивления СВП, а также формулировку и решение основных уравнений рассматриваемой модели для определения их вольт-амперных и вольт-ваттных характеристик.



$I_L, I_{Fu}$  и  $I$  – ток резистора нагрузки  $R_L$ , ток коротко замкнутого компонента и токи, генерируемые  $PV_i$ .

Рисунок 1 – Упрощенная схема, иллюстрирующая защиту от короткого замыкания в параллельном соединении фотоэлектрических компонентов  $PV_i$  ( $i=1, 2, \dots, n-1$ ) с использованием самовосстанавливающихся предохранителей  $Fu_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )

ФЭП обладают нелинейными вольт-амперными характеристиками, которые зависят от уровня солнечной радиации, температуры окружающей среды и особенностей самой ячейки.

В настоящее время известно несколько основных схем замещения ФЭП, математическое описание которых используется в современном моделировании [15–17]. Наиболее известная из них, содержит источник фототока ( $i_{ph}$ ), параллельно включенный диод ( $D$ ), который моделирует р-п-переход, шунтовое сопротивление ( $r_{sh}$ ), моделирующее токи утечки, и последовательное сопротивление ( $r_s$ ), которое характеризует внутреннее сопротивление элемента и контактов. В рабочем режиме ФЭП (прямосмещенный фотодиод) током утечки пренебрегают, т.е. принимают, что  $r_{sh}$  стремится к бесконечности и эквивалентная схема замещения ФЭП имеет вид, показанный на рис. 2.

В соответствии с этой схемой замещения выходной ток фотоэлемента  $i$  может быть определен [15, 16] из выражения

$$i = i_{ph} - i_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(v + ir_s)}{AkT} \right] - 1 \right\}, \quad (1)$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от физических свойств материалов и параметров р-п-перехода (для кремния принимается равным 1,2...1,8 соответственно с [15, 18]).

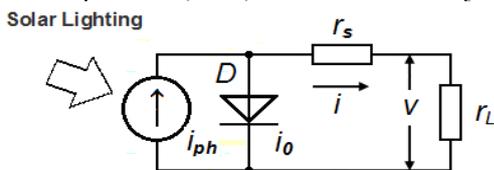


Рисунок 2 – Упрощенная эквивалентная схема замещения ФЭП

Как уже говорилось выше, при последовательном, параллельном или комбинированном соединении фотоэлектрических элементов образуются ФЭМ. Для определения эквивалентных ВАХ таких соединений используются различные формы их представления [15, 19–23].

Для построения рассматриваемой модели, соответствующей параллельному соединению  $n$  ФЭМ (каждый из которых является последовательное соединением  $m$  ФЭП) представляется наиболее подходящим известное выражение, непосредственно базирующееся на формуле (1) [15, 20–22]

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{V - V_{oc} + IR_s}{U_T} \right] \right\}, \quad (2)$$

где  $I_{sc} = n \cdot i_{sc}$  – ток короткого замыкания фотоэлектрического модуля;  $i_{sc} = i(v=0) = i_{ph}$  – ток короткого замыкания ФЭП (наибольший ток, производимый ФЭП при условии замыкания его контактов);  $U_T = (AkT/q) \cdot m$  – эквивалентное термальное напряжение модуля;  $V_{oc} = m \cdot v_{oc}$  – напряжение холостого хода модуля,  $v_{oc} = v(i=0) = (AkT/q) \ln[(i_{ph} + i_0)/i_0]$  – напряжение холостого хода ФЭП (падение напряжения на р-п-переходе, которое создает фототоком ( $i_{ph}$ ), если ток во внешней цепи ( $i$ ) равен нулю;  $R_s = r_s \cdot m/n$  – эквивалентное последовательное сопротивление модуля.

Самовосстанавливающиеся предохранители «Polyswith» имеют температурную зависимость сопротивления  $R_{Fu}$ , возрастающую с ростом температуры, которая имеет три характерных участка. При относительно небольших значениях температуры (участок 1) имеет место плавное повышение их сопротивления от температуры. В узком диапазоне температуры около 125°C наблюдается резкий рост (на несколько порядков) сопротивления СВП (участок 2). При дальнейшем увеличении температуры зависимость сопротивления этих устройств от температуры также имеет плавный возрастающий характер (участок 3) [11].

Физический механизм причины такой скачкообразной зависимости определяется структурными особенностями основного функционального материала СВП, который представляет собой наноккомпозит с непроводящей полимерной матрицей и высокопроводящим нанокуглеродным наполнителем. Благодаря углеродным каналам в неразогретом состоянии (участок 1) наноккомпозит является проводником с низким собственным сопротивлением.

При разогреве выше определенной температуры (температуры перехода) углеродные каналы разрываются за счет объемного расширения полимерной матрицы и/или трансформации кристаллической структуры матрицы в аморфную и электрическое сопротивление наноккомпозита резко возрастает (участок 2) [11–12]. На высоко-температурном участке 3 структура проводящих каналов полностью разрушена и сопротивление СВП достигает максимальной величины.

Техническое применение имеют участок 1 (высокопроводящее состояние) и 2 (скачкообразный переход к низкопроводящему состоянию).

В качестве основных параметров, важных для их применения в схеме рис. 1, следует принять:

$R_{Fu0}$  – сопротивление СВП в проводящем состоянии (определяется паспортными величинами  $R_{\min}$  – максимальное минимальное начальное сопротивление или  $R_{1\max}$ , – минимальное сопротивление после одного часа восстановления при заданной температуре окружающего воздуха);  $I_{trip}$  – ток срабатывания СВП, т.е. минимальный ток через СВП, при котором происходит переход от проводящего состояния к непроводящему.

Защита параллельного соединения фотоэлектрических компонентов солнечных батарей (рис. 1) может быть реализована при выполнении следующих условий

$$R_{Fu0} = R_{\min} \text{ (или } R_{1\max}) \ll m R_s^* \quad (3)$$

где  $R_s^* = r_s$  или  $R_s^* = R_s$  в последовательном соединении  $m$  ячеек или модулей, соответственно.

То есть наличие таких предохранителей в электрической цепи не должно влиять на нормальную работу фотоэлектрических компонентов.

Второе условие:

$$(n-1) \cdot I^* > I_{trip} > I_{SC}^* \quad (4)$$

где  $I^* = i$ ,  $I_{SC}^* = i_{SC}$  или  $I^* = I$ ,  $I_{SC}^* = I_{SC}$  в последовательном соединении  $m$  ячеек или модулей, соответственно.

Т.е. ток срабатывания предохранителя РРТС должен быть больше тока короткого замыкания отдельного компонента (отдельного фотоэлектрического модуля или фотоэлемента) и меньше, чем ток их параллельного соединения в рабочем режиме  $(n-1) \cdot I^*$ , где  $(n-1)$  – число исправных ФЭМ или ФЭП. Учитывая характерное для СВП уменьшение тока срабатывания с ростом температуры, следует отметить, что первое из указанных требований должно быть выполнено при максимально возможной температуре функционирования ФЭП (~60...80°C [10]).

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Определение аналитических выражений модели может быть произведено на основе уравнений Кирхгофа и известных математических описания для ВАХ рассматриваемых фотоэлектрических систем и электрических характеристик используемых электронных приборов. В частности, учет присутствия СВП (рис. 1) может быть произведен заменой в соответствующей эквивалентной схеме и формуле последовательного сопротивления  $r_s$  на его сумму с частью сопротивления  $R_{Fu}$ , приходящейся на каждый ФЭП в последовательном их соединении, т.е.  $(R_s^* + R_{Fu})$ .

Следует отметить, что в соответствии с базовым принципом использования СВП [10] их сопротивление до срабатывания при повышении температуры

пренебрежимо малы в сравнении с последовательным сопротивлением отдельного ФЭМ, и таким образом в нормальном режиме можно принять  $R_{Fu0} \ll R_s^*$ .

Наличие короткого замыкания одного фотоэлектрического компонента в соответствии со схемой рис. 1 может рассматриваться как параллельное соединение сопротивления нагрузки  $R_L$  и сопротивления предохранителя  $R_{Fu}(I_{Fu})$ , зависящего от величины протекающего через него тока  $I_{Fu}$ . Следует отметить, что сопротивление нагрузки  $R_L$  для упрощения расчетов принималось активным, хотя оно может быть и реактивным (например, емкостным) или, в общем случае, комплексным.

Примем во внимание, что:

$$V = V(I_{Fu}, R_L) = I(I_{Fu}, R_L) \frac{R_{Fu}(I_{Fu})R_L}{R_{Fu}(I_{Fu}) + R_L} \quad (5)$$

где  $I(I_{Fu}, R_L) = I_{Fu} + I_L$  – величина суммарного тока через короткозамкнутый элемент цепи и сопротивление нагрузки.

С учетом (5) уравнение для расчета ВАХ рассматриваемой фотоэлектрической системы (при наличии коротко замкнутого одного из ее модулей) можно получить на основе (2), которое после преобразования (разрешения относительно  $V$ ) будет иметь следующий вид:

$$V(I_{Fu}, R_L) = U_T \ln \left[ \frac{I_{SC} - I(I_{Fu}, R_L)}{I_{SC}} \right] - V_{OC} + I(I_{Fu}, R_L) R_S \quad (6)$$

где

$$I(I_{Fu}, R_L) = I_{Fu} \left[ 1 + \frac{R_{Fu}(I_{Fu})}{R_L} \right]$$

При определении параметров  $U_T$ ,  $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$ , и  $R_S$  надо заменить величину  $m$  (число ФЭМ соединенных параллельно на схеме рис. 1) на  $(m-1)$ .

ВАХ самовосстанавливающегося предохранителя, как и любого позисторного элемента представляется  $N$ -образной зависимостью и может быть определена в параметрической форме, где в качестве такого параметра используется температура его нагрева [24, 25]. Однако, использование таких представлений существенно усложняет рассматриваемую задачу. Для ее упрощения, допускающего получение понятного адекватного результата, представляется возможным использовать представления о скачкообразном изменении сопротивления рассматриваемых СВП в области токов в окрестности тока срабатывания  $I_{trip}$ . Таким образом, можно принять, что зависимость  $R_{Fu}(I_{Fu})$  имеет вид переключательной функции, которую можно аппроксимировать функцией вида:

$$R_{Fu}(I_{Fu}) = \left\{ \begin{array}{l} R_{Fu0}, \text{ если } I_{Fu} < I_{Fu0} \\ R_{Fu0} \left( \frac{I_{Fu}}{I_{Fu0}} \right)^\alpha, \text{ если } I_{Fu} > I_{Fu0} \end{array} \right\}, \quad (7)$$

где  $R_{Fu0} = R_{\min}$  (или  $R_{1\max}$ );  $I_{Fu} = I_{trip}$ .

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Как уже отмечалось, параметрами, определяющими эффективность использования СВП для защиты фотоэлектрических систем от коротких замыканий, являются сопротивление предохранителя в проводящем состоянии  $R_{Fu}$  и ток его срабатывания  $I_{Fu0}$ .

Таблица 1 – Параметры элементов модели фотоэлектрической системы

Компонент	Параметры	Принятые значения
ФЭП [18]	$i_0$	1 мкА
	$i_{ph}$	0,039 А
	$r_s$	2 Ом
	$A$	1,8
СМП (из серии RXEF) [26]	$R_{Fu0}$	0,1–1 Ом
	$I_{Fu0}$	0,3–1 А
Число ФЭП в их последовательном соединении (в ФЭМ)	$m$	36
Число параллельных соединений ФЭМ	$n$	36

Для исследования функционирования рассматриваемых технических средств защиты были проведены численные эксперименты на основе фотоэлектрической системы (рис. 1) с компонентами на основе элементов с типовыми параметрами, приведенными в табл. 1.

Параметр  $\alpha$  в формуле (7) принимался равным 25.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние величины сопротивления  $R_{Fu0}$  на вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики исследуемой фотоэлектрической системы показано на рис. 3 и рис. 4.

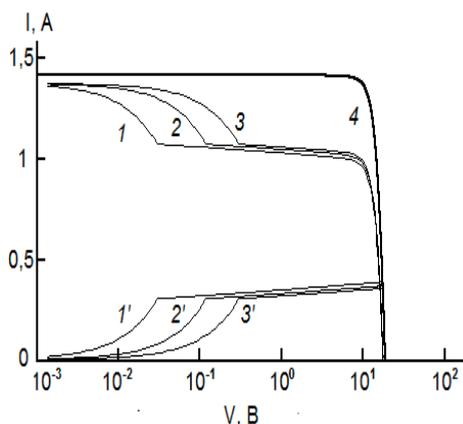


Рисунок 3 – Вольт-амперные характеристики  $I_L(V)$  (кривые 1–4) и зависимости тока через СВП  $I_{Fu}$  от  $I_{Fu}(V)$  (1'–3') моделируемой фотоэлектрической системы при наличии короткого замыкания одного из ее компонентов

Параметры СВП  $I_{Fu0} = 0,3$  А и  $R_{Fu0}$ , Ом: 1 – 0,1; 2 – 0,4; 3 – 1.

Кривые 4 соответствуют отсутствию короткого замыкания  
 © Тонкошкур А. С., Накашидзе Л. В., 2019  
 DOI 10.15588/1607-3274-2019-2-2

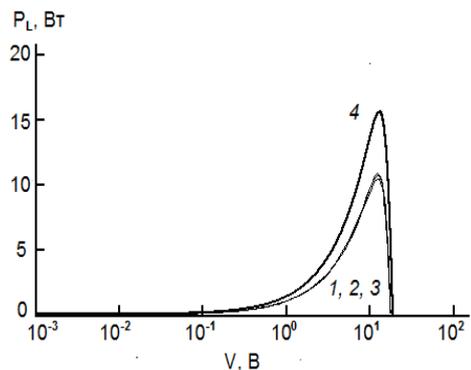
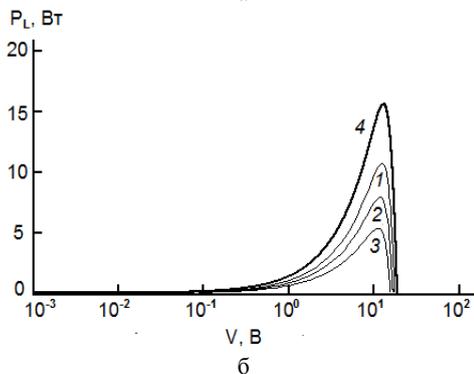
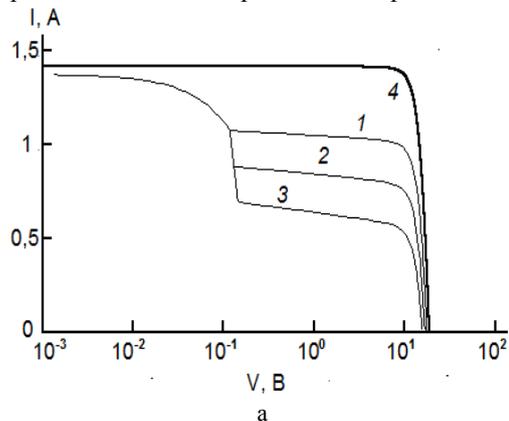


Рисунок 4 – Вольт-ваттные характеристики  $P_L(V)$  моделируемой фотоэлектрической системы при наличии короткого замыкания одного из ее компонентов. Параметры и обозначения соответствуют принятым на рис. 3

Влияние величины тока срабатывания СВП на аналогичные характеристики рассматриваемой фотоэлектрической системы приведены на рис. 5.



Параметры СВП  $R_{Fu0} = 0,4$  Ом и  $I_{Fu0}$ , А: 1 – 0,3; 2 – 0,5; 3 – 0,7. Кривые 4 соответствуют отсутствию короткого замыкания

Рисунок 5 – Вольт-амперные (а) и вольт-ваттные (б) характеристики моделируемой фотоэлектрической системы при коротком замыкании одного из ее компонентов

#### 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из рис. 3, влияние сопротивления СВП в проводящем состоянии  $R_{Fu0}$  имеет место в диапазоне очень малых напряжений  $V$ . Оно ограничивает его начальный участок, где сопротивление нагрузки  $R_L$  меньше  $R_{Fu0}$  и практически отсутствует отбор тока с

нагрузки на предохранитель. С уменьшением сопротивления  $R_{F_{i0}}$  этот участок сокращается.

При более высоких значениях  $R_L$  ток через СВП увеличивается, что приводит в итоге к его срабатыванию, после чего получается типовая для фотоэлектрических систем зависимость  $I_L(V)$ , но со значением тока короткого замыкания уменьшенным на величину, которая представляет собой сумму токов отключенного (короткозамкнутого) последовательного соединения ФЭП ( $PV_n$ ) и тока срабатывания предохранителя  $F_{i_n}$ .

Наличие СВП приводит только к определенному снижению производимой фотоэлектрической системой электрической мощности, а не полному ее выходу из строя (рис. 4). Изменение сопротивления предохранителя в проводящем состоянии практически не влияет на ВВХ

Как свидетельствуют эти данные рис. 5а и рис. 5б, изменения величины тока срабатывания предохранителя определяют изменения максимального тока и производимой электрической мощности в рабочем диапазоне, где реализуется защита от короткого замыкания, т.е. СВП находится в состоянии с высоким значением сопротивления. Уменьшение величины  $I_{F_{i0}}$  снижает энергетические затраты на поддержание предохранителя в низкопроводящем состоянии, блокирующем короткое замыкание компонента параллельной цепи. В итоге, это приводит к росту тока нагрузки  $I_L$  и мощности  $P_L$ , т.е. повышению эффективности работы всей фотоэлектрической системы. Основным ограничением снизу при определении тока срабатывания СВП является требование отсутствия какого-либо влияния предохранителя на нормально функционирующий (в отсутствии его коротких замыканий рассматриваемого вида) фотоэлектрический компонент (ФЭМ или ФЭП), т.е.  $I_{F_{i0}} > I_{SC}$ .

Следует также отметить, что потери производимой электрической энергии на работу предохранителя в рассматриваемой ситуации короткого замыкания одного из параллельно соединенных фотоэлектрических компонентов могут быть и меньшими, чем получены в рамках рассматриваемой модели, базирующейся на аппроксимации характеристики СВП переключательной функцией, которая не учитывает, что при увеличении падения напряжения на предохранителе его ток может уменьшаться.

## ВЫВОДЫ

Предложено схемное решение ограничения тока в фотоэлектрических системах солнечных батарей с использованием самовосстанавливающихся предохранителей «Polyswitch».

Разработана математическая модель схемного решения и проведено моделирование его основных характеристик при использовании типичных параметров фотоэлектрических преобразователей на основе монокристаллического кремния и коммерческих самовосстанавливающихся предохранителей. Проанализировано влияние величины сопротивления в проводя-

щем состоянии и тока срабатывания СВП на ВАХ и ВВХ параллельного соединения фотоэлектрических компонентов солнечных батарей.

Показано, что эффективное ограничение тока при наличии короткого замыкания в параллельном соединении фотоэлектрических компонент может быть реализовано при выполнении следующих условий:

– сопротивление предохранителя в проводящем состоянии значительно меньше параллельного соединения последовательных сопротивлений фотоэлектрических компонент;

– ток срабатывания предохранителя должен быть больше тока короткого замыкания отдельного фотоэлектрического компонента и меньше тока их параллельного соединения.

## ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Köntges M. Review of failures of photovoltaic modules. IEA PVPS Task 13 / [M. Köntges, S. Kurtz, C. Packard et al.], 2014. – 132 p.
2. United Solar Technologies – Солнечные модули и батареи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ust.su/solar/media/section-inner17>.
3. 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.
4. 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. – June. – 2013. – P. 1–8.
5. 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. – 5 (5). – P. 1435–1441.
6. Acciari G. Higher PV module efficiency by a novel CBS bypass / G. Acciari, D. Graci, A. L. Scala // IEEE Trans. Power Electron. – May 2011. – Vol. 26, No. 5. – P. 1333–1336.
7. d'Alessandro V. A simple bipolar transistor-based bypass approach for photovoltaic modules / V. d'Alessandro, P. Guerriero, S. Daliento // IEEE J. Photovoltaics. – Jan. 2014. – Vol. 4, No. 1. – P. 405–413.
8. Pacheco Sánchez F. J. Photovoltaic systems distributed monitoring for performance optimization. Doct. Thesis, Universidad de Málaga (RIUMA: riuma.uma.es) / F. J. Sánchez Pacheco. – Málaga, España, 2015.
9. 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 (5). – P. 1428–1434.
10. Применение самовосстанавливающихся элементов для электрической защиты солнечных батарей / [А. С. Тонкошкур, А. В. Иванченко, Л. В. Накашидзе, С. В. Мазурик] // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2018. – № 1. – С. 43–49.
11. Гавриков В. Самовосстанавливающиеся РТС-предохранители для защиты от токовых перегрузок / В. Гавриков // Новости Электроники. – 2014. – № 12. – С. 11–15.

12. Каминская Т. П. Самовосстанавливающиеся предохранители для автомобильной электроники / Т. П. Каминская, К. И. Домкин // Электронные компоненты. – 2008. – № 5. – С. 80–82.
13. Pat. 6608470 USA. Overcharge protection device and methods for lithium based rechargeable batteries / J. W. Oglesbee, A. G. Burns. – 19.08.03.
14. Protecting rechargeable Li-ion and Li-polymer batteries [Electronic resource]: Littelfuse, Inc. – 2017. – Available at: [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](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. Левшов А. В. О математическом моделировании фотоэлектрических модулей / А. В. Левшов, А. Ю. Федоров // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика». – №1(14)' – 2013. – С. 153–158.
16. Раушенбах Г. «Справочник по проектированию солнечных батарей» / Г. Раушенбах. – М. : Энергоатомиздат, – 1983. – 360 с.
17. Lorenzo E. Solar Electricity Engineering of Photovoltaic Systems / E. Lorenzo // Artes Graficas Gala. – Spain, 1994.
18. Коваль О. С. Определение параметров солнечного элемента из его световой вольт-амперной характеристики / О. С. Коваль, М. С. Тиванов // Вестник БГУ. – 2012. – Сер. 1. – № 2. – С. 39–44.
19. Salem F. A. Modeling and Simulation issues on Photovoltaic systems, for Mechatronics design of solar electric applications / F. A. Salem // International Journal of Mechanical Engineering (IJME). – August 2014. – Vol. 2, Issue 8. – P. 24–7. <http://www.ipasj.org/IJME/IJME.htm>
20. Alboteanu I. L. Modelling and simulation of a stand-alone photovoltaic system / I. L. Alboteanu, S. Ivanov, G. Manolea // 8th WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS (PS 2008), Santander, Cantabria, Spain, 2008. – September 23–25. – P. 189–194.
21. Models for a Stand-Alone PV System / [A. D. Hansen, P. Sorensen, L. H. Hansen, H. Binder]. – Roskilde, 2000. – 78 p.
22. Гаевский А. Ю. Определение параметров фотоэлектрических модулей на основе точного решения уравнения для ВАХ / А. Ю. Гаевский // Відновлювальна енергетика. – 2012. – № 4. – С. 32–39
23. Honsberg C. Arisone State University. Solar Power Labs [Electr. Resource] / C. Honsberg, S. Bowden. – Available at: <http://www.pveducation.org/pvcdrom>
24. Мэклин Э. Д. Терморезисторы / Э. Д. Мэклин. – М. : Радио и связь, 1983. – 208 с.
25. Тонкошкур О. С. Компонентна база РЕА / О. С. Тонкошкур, О. Н. Тристан, О. М. С'янов. – Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2004. – 240 с.
26. PolySwitch™ Resettable Device Short Form Catalog. May. – 2005. Tuco Electronics. Raychem circuit protection. [Electr. Resource]. – Available at: <https://datasheet.octopart.com/MICROSMD010F-2-Tuco-Electronics-datasheet-45906.pdf>

Received 07.11.2018.  
Accepted 14.03.2019.

УДК 621.31

#### МОДЕЛЮВАННЯ ОБМЕЖЕННЯ СТРУМУ В ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ САМОВІДНОВЛЮВАНОВОГО ЗАПОБІЖНИКА «POLYSWITCH»

**Тонкошкур О. С.** – д-р фіз.-мат. наук, професор, професор кафедри електронних обчислювальних машин, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Україна.

**Накашидзе Л. В.** – канд. техн. наук, старш. наук. співр., директор НДІ енергетики Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Україна.

#### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** Рішення завдання підвищення надійності сонячних батарей, включаючи усунення нештатних (пожежо-небезпечних) ситуацій, на основі розробки методів і засобів запобігання струмових перевантажень в їх фотоелектричних системах.

**Мета.** Вивчення перспективи мінімізації струмових перевантажень у фотоелектричних системах сонячних батарей шляхом застосування недорогих елементів функціональної електроніки, зокрема відносно нових і тих, що набули широкого поширення, самовідновлюваних запобіжників типу «Polyswitch».

**Метод.** Запропоновано схемне рішення і методом моделювання обґрунтовані можливості використання запобіжників типу Polyswitch для запобігання та мінімізації струмових перевантажень у фотоелектричних системах сонячних батарей.

**Результати.** Проаналізовано вплив величини опору в провідному стані та струму спрацьовування запобіжників на вольт-амперні та вольт-ватні характеристики паралельних з'єднань фотоелектричних перетворювачів і їх модулів.

**Висновки.** Показано, що ефективне обмеження струму за наявності короткого замикання при такому з'єднанні фотоелектричних компонент може бути реалізовано при виконанні таких умов:

– опір запобіжника в провідному стані значно менше послідовного опору фотоелектричного компонента;

– струм спрацьовування запобіжника повинен бути більшим струму короткого замикання окремого фотоелектричного компонента і меншим струму їх паралельного з'єднання.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** фотоелектричний перетворювач, струмові перевантаження, самовідновлюваний запобіжник, вольт-амперні характеристики, вольт-ватні характеристики, моделювання.

UDC 621.31

#### MODELING OF CURRENT LIMITATIONS IN PHOTO-ELECTRICAL SYSTEMS OF SOLAR BATTERIES USING SELF-RESTORING FUSES POLYSWITCH

**Tonkoshkur A. S.** – Doctor of Phys. Mat. Sciences, Professor, Professor of the Department of Electronic Computers, Oles Honchar Dnipro National University, Ukraine.

**Nakashidze L. V.** – PhD, Senior Scientific Reseacher, Director of Energy Research Institute, Oles Honchar Dnipro National University, Ukraine.

## ABSTRACT

**Context.** Solving the problem of increasing the reliability of solar cells, including the elimination of abnormal (fire hazardous) situations based on the development of methods and means to prevent current overloads in their photovoltaic systems.

**Objective.** The study of the prospects of minimizing current overloads in photovoltaic systems of solar cells through the use of low-cost elements of functional electronics in particular rather new and widely used self-healing fuses of the type “Polyswith”.

**Method.** A circuit design is proposed and the modeling method makes it possible to use Polyswitch-type fuses to prevent and minimize current overloads in photovoltaic solar panels.

**Results.** The influence of the magnitude of the resistance in the conducting state and the current of operation of the fuses on the current-voltage and voltage-watt characteristics of parallel connections of photoelectric converters and their modules is analyzed.

**Conclusions.** It is shown that an effective current limitation in the presence of short-circuits with such a connection of photovoltaic components can be realized under the following conditions:

- the resistance of the fuse in the conducting state is much less than the consistent resistance of the photoelectric component;
- the current of the fuse should be greater current of short circuit of a separate photoelectric component and less current of their parallel connection.

**KEYWORDS:** photoelectric converter, overcurrent, self-resetting fuses, current-voltage characteristics, voltage-watt characteristics, simulation.

## REFERENCES

1. Köntges M., Kurtz S., Packard C., Jahn U., Berger K. A., Kato K., Friesen T., Liu H., Van Iseghem M. Review of failures of photovoltaic modules. IEA PVPS Task 13, 2014, 132 p.
2. United Solar Technologies – Solnechnye moduli i batarei [Electronic resource]. Available at: <http://ust.su/solar/media/section-inner17>.
3. Tonkoshkur A. S., Nakashidze L. V., Lyagushyn S. F. Schemotechnical technologies for reliability of solar arrays, Sistemni tehnologii. Regional'nij mizhvuzivs'kij zbirnik naukovix prac', Vip. 4'(117). Dnipro, 2018, pp. 95–107.
4. Kim K. A., Krein P. T. Photovoltaic hot spot analysis for cells with various reverse-bias characteristics through electrical and thermal simulation, *Proc. IEEE Workshop Control Modeling Power Electron.* June, 2013, pp. 1–8.
5. Kim K. A., Krein P. T. Reexamination of photovoltaic hot spotting to show inadequacy of the bypass diode, *IEEE J. Photovoltaics*, 5 (5), 2015, pp. 1435–1441.
6. Acciari G., Graci D., Scala A. L. Higher PV module efficiency by a novel CBS bypass, *IEEE Trans. Power Electron.* May 2011, Vol. 26, No. 5, pp. 1333–1336.
7. d'Alessandro V., Guerriero P., Daliento S. A simple bipolar transistor-based bypass approach for photovoltaic modules, *IEEE J. Photovoltaics*, Jan. 2014, Vol. 4, No. 1, pp. 405–413.
8. Pacheco Sánchez F. J. Photovoltaic systems distributed monitoring for performance optimization. Doct. Thesis, Universidad de Málaga (RIUMA: riuma.uma.es) / F. J. Sánchez Pacheco. Málaga, España, 2015.
9. Di Napoli F., Guerriero G., d'Alessandro V., Daliento S. Single panel voltage zeroing system for safe access on PV plants, *IEEE J. Photovoltaics*, 2015, Vol. 5 (5), pp. 1428–1434.
10. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Nakashidze L. V., S. V. Mazurik. Primenenie samovosstanavlivajushhijhsja jelementov dlja jelektricheskij zashhity solnechnykh batarej, *Tehnologija i konstruirovanie v jelektronnoj apparature*, 2018, No. 1, pp. 43–49.
11. Gavrikov V. Samovosstanavlivajushhiesja PTC-predohraniteli dlja zashhity ot tokovykh peregruzok, *Novosti Jelektroniki*, 2014, No. 12, pp. 11–15.
12. Kaminskaja T. P., K. I. Domkin. Samovosstanavlivajushhiesja predohraniteli dlja avtomobil'noj jelektroniki, *Jelektronnye komponenty*, 2008, No. 5, pp. 80–82.
13. Oglesbee J. W., Burns A. G. Pat. 6608470 USA. Overcharge protection device and methods for lithium based rechargeable batteries. 19.08.03.
14. Protecting rechargeable Li-ion and Li-polymer batteries [Electronic resource]: Littelfuse, Inc, 2017, Available at: [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](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. Levshov A. V., Fjodorov A. Ju. O matematicheskom modelirovanii fotoelektricheskijh modulej / A. V. Levshov, // *Naukovi praci DonNTU. Serija: «Elektrotehnika i energetyka»*, No. 1(14)', 2013, pp. 153–158.
16. Raushenbah G. «Spravochnik po proektirovaniju solnechnykh batarej». Moscow, Jenergoatomizdat, 1983, 360 p.
17. Lorenzo E. Solar Electricity Engineering of Photovoltaic Systems, Artes Graficas Gala, Spain, 1994.
18. Koval' O. S., Tivanov M. S. Opredelenie parametrov solnechnogo elementa iz ego svetovoj vol't-ampernoj harakteristiki, *Vestnik BGU*, 2012, Ser. 1, No. 2, pp. 39–44.
19. Salem F. A. Modeling and Simulation issues on Photovoltaic systems, for Mechatronics design of solar electric applications, *International Journal of Mechanical Engineering (IJME)*. August 2014, Vol. 2, Issue 8, pp. 24–7. <http://www.ipasj.org/IJME/IJME.htm>
20. Alboteanu I. L., Ivanov S., Manolea G. Modelling and simulation of a stand-alone photovoltaic system, *8th WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS (PS 2008)*, Santander, Cantabria, Spain, 2008, September 23–25, pp. 189–194.
21. Hansen A. D., Sorensen P., Hansen L. H., Binder H. Models for a Stand-Alone PV System. Roskilde, 2000, 78 p.
22. Gaevskij A. Ju. Opredelenie parametrov fotoelektricheskijh modulej na osnove tochnogo reshenija uravnenija dlja VAH, *Vidnovljuval'na energetik*, 2012, No. 4, pp. 32–39.
23. Honsberg C., Bowden S. Arisone State University. Solar Power Labs [Electr. Resource], Available at: <http://www.pveducation.org/pvcdrom>
24. Mjeklin Je. D. Termorezistory. Moscow, Radio i svjaz', 1983, 208 p.
25. Tonkoshkur O. S., Trystan O. N., S'janov O. M. Komponentna baza REA. Dniprodzerzhyn'sk, DDTU, 2004, 240 p.
26. PolySwitch™ Resettable Device Short Form Catalog. May, 2005. Teco Electronics. Raychem circuit protection. [Electr. Resource]. Available at: <https://datasheet.octopart.com/MICROSMD010F-2-Tyco-Electronics-datasheet-45906.pdf>