

ПРИМЕНЕНИЕ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ «POLYSWITCH» ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ТОКОВЫХ ПЕРЕГРУЗОК В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

А.С. Тонкошкур, докт. физ.-мат. наук, профессор, **Л.В. Накашидзе**, докт. техн. наук, директор НИИ энергетики

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара,
49050, пр-т Гагарина, 72, г. Днепр, Украина.

Актуальность. 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. Поэтому необходимо повышения надежности солнечных батарей, включая устранение нештатных (пожароопасных) ситуаций на основе разработки методов и средств предотвращения токовых перегрузок в их фотоэлектрических системах на основе новых подходов.

Цель. Разработка универсального подхода для минимизации токовых перегрузок в фотоэлектрических системах солнечных батарей путем применения недорогих элементов функциональной электроники, в частности, относительно новых и, получивших широкое распространение, самовосстанавливающихся предохранителей типа “Polyswith”.

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.

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

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. Библ. 26, рис. 5, табл. 1.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, токовые перегрузки, самовосстанавливающиеся предохранители, вольт-амперные характеристики, вольт-ваттные характеристики, моделирование.

THE USE OF RESTTABLE FUSES “POLYSWITCH” TO PREVENT CURRENT OVERLOADS IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

A. Tonkoshkur, doctor of physical and mathematical sciences, professor, **L. Nakashidze**, doctor of technical science, director of Energy Research Institute

Oles Honchar Dnipro National University,
49005, 72 Gagarina Av., Dnipro, Ukraine.

Relevance. Currently available simulation results and experimental data indicate that bypass diodes in the subpanel rows of photovoltaic cells do not fully protect against the appearance of “hot spots”. Bypass diodes are more effective for preventing “hot spots” with very short PV-cell line lengths, which is not used in modern panel designs for economic reasons. Therefore, it is necessary to increase the reliability of solar cells, including the elimination of emergency (fire hazardous) situations based on the development of methods and means to prevent current overloads in their photovoltaic systems based on new approaches.

Purpose. Development of a universal approach to minimize current overloads in photovoltaic systems of solar cells by using low-cost elements of functional electronics, in particular, relatively new and widely used self-healing fuses of the Polyswith type.

Method. A circuit solution is proposed and the modeling method substantiates the possibility of using Polyswitch type fuses to prevent and minimize current overloads in solar PV systems.

Results. The influence of the resistance value in the conducting state and the fuse trip current on the current-voltage and power-voltage characteristics of parallel connections of photoelectric converters and their modules is analyzed.

A mathematical model of the circuit solution is developed and its basic characteristics are simulated using typical parameters of monocrystalline silicon photoelectric converters and commercial self-healing fuses. The influence of the resistance value in the con-

ducting state and the trip current of the Rfu on the current-voltage and power-voltage characteristics of the parallel connection of the photovoltaic components of solar cells is analyzed.

Conclusion. It is shown that effective current limiting in the presence of a short circuit with such a connection of photovoltaic components can be implemented when the following conditions are met:

- the resistance of the fuse in the conducting state is much less than the parallel connection of the series resistances of the photoelectric components;

- the trigger current of the fuse must be greater than the short circuit current of the individual photovoltaic component and less than the current of their parallel connection. Ref. 26, fig. 5, tabl. 1.

Keywords: photoelectric converter, overcurrent, resettable fuses, current-voltage characteristics, power-voltage characteristics, simulation.



A.S. Tonkoshkur
A. Tonkoshkur

Сведения об авторе: докт. физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектроники Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара.

Образование: Днепропетровского государственного университета, физико-технический факультет, специальность радиофизика и электроника (1971).

Научная сфера: возобновляемые и нетрадиционные источники энергии.

Публикации: 300 научных работ и учебно-методических пособий.

ORCID: 0000-0002-1648-675X

Контакты: тел./факс: (056) 373-12-78

e-mail: tonkoshkuras@ukr.net

Author information: doctor of physics and mathematics, professor Department of Radio Electronics of Oles Gonchar Dnipro National University.

Education: Dnipropetrovsk National University in 1971 graduated from Dnipropetrovsk State University, specializing in radiophysics and electronics.

Research area: renewable and non-conventional energy sources.

Publications: author of more than 300 scientific and teaching works.

ORCID: 0000-0002-1648-675X

Contacts: tel./fax: (056) 373-12-78

e-mail: tonkoshkuras@ukr.net



L.V. Nakashidze
L. Nakashidze

Сведения об авторе: докт. техн. наук, старш. научн. сотр. директор НИИ энергетики Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара.

Образование: Днепропетровский химико-технологический институт, факультет технология неорганических соединений, специальность технология неорганических соединений (1985).

Научная сфера: возобновляемые и нетрадиционные источники энергии.

Публикации: более 120 научных работ, в том числе 3 патента.

ORCID: 0000-0003-3990-6718

Контакты: тел.: (056) 373 12 78

e-mail: foton_dnu@ukr.net

Author information: doctor of technical science, director of the Energy Research Institute Oles Honchar Dnipropetrovsk National University.

Education: Dnepropetrovsk Institute of Chemical Technology, Faculty of Technology of inorganic compounds, specialty technology of inorganic compounds (1985).

Research area: the renewable and alternative energy sources.

Publications: author of more than 120 scientific papers, including 3 patents.

ORCID: 0000-0003-3990-6718

Contacts: tel.: (056) 373 12 78

e-mail: foton_dnu@ukr.net

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 повреждения 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 фотоэлектрических модулей (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 фотоэлектрических преобразователей (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 их 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 такие решения 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 обнаружение «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].

Постановка задачи. Одним из перспективных направлений решения рассматриваемой задачи является применение для изоляции неактивных (затененных или дефектных) областей

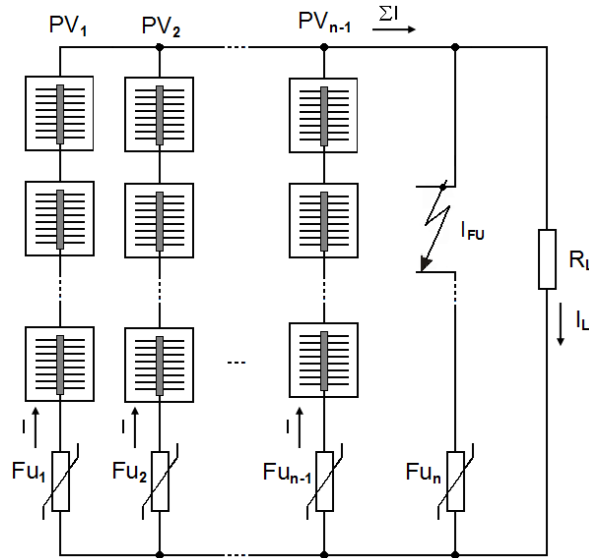
как отдельных ФЭП, так и их модулей, менее дорогостоящих элементов функциональной электроники, в частности, относительно новых и, получивших широкое распространение, самовосстанавливающихся предохранителей (СВП) типа «Polyswith» [3, 10]. Эти элементы электрической и тепловой защиты уже нашли применение 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.

Модель фотоэлектрической системы с ограничителем тока. Как уже указывалось, короткие замыкания являются наиболее нежелательными в параллельных соединениях как фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) та их последовательных соединений фотоэлектрических модулей (ФЭМ). Из рис. 1 видно, что короткое замыкание одного компонента PVn в отсутствие СВП ведет к потере всей параллельной цепи, содержащей другие исправные компоненты.

Наличие самовосстанавливающихся предохранителей F_{ui} , 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.

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



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

Рис. 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 ($i=1, 2, \dots, n$).

Fig. 1. Simplified diagram illustrating short-circuit protection in parallel connection of PV components PV_i ($i=1, 2, \dots, n-1$) using self-resetting fuses Fu_i ($i=1, 2, \dots, n$).

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 p-n-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 p-n-перехода (для кремния принимается равным 1,2...1,8 соответственно [15, 18]); k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура ФЭП; q – заряд электрона; v – выходное напряжение ФЭП; i_0 – обратный ток p-n-перехода диода. r_L – сопротивление нагрузки.

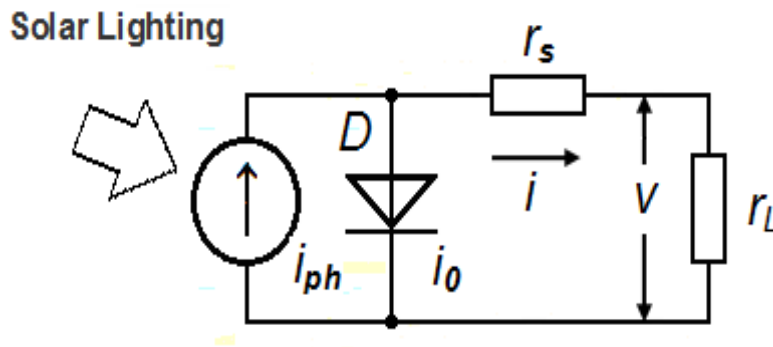


Рис. 2. Упрощенная эквивалентная схема замещения ФЭП.

Fig. 2. Simplified equivalent circuit of PVM.

Как уже говорилось выше, при последовательном, параллельном или комбинированном соединении фотоэлектрических элементов образуются ФЭМ. Для определения эквивалентных вольт-амперных характеристик (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-р-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 0C 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 высокотемпературном 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_{1max} , – 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

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

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 ($\sim 60 \dots 80$ °C [10]).

Определение аналитических выражений модели может быть произведено на основе уравнений Кирхгофа и известных математических описаниях 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 рассматривать 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 в 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 представлений 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 в функции вида:

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

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

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 фотозлектрической системы.

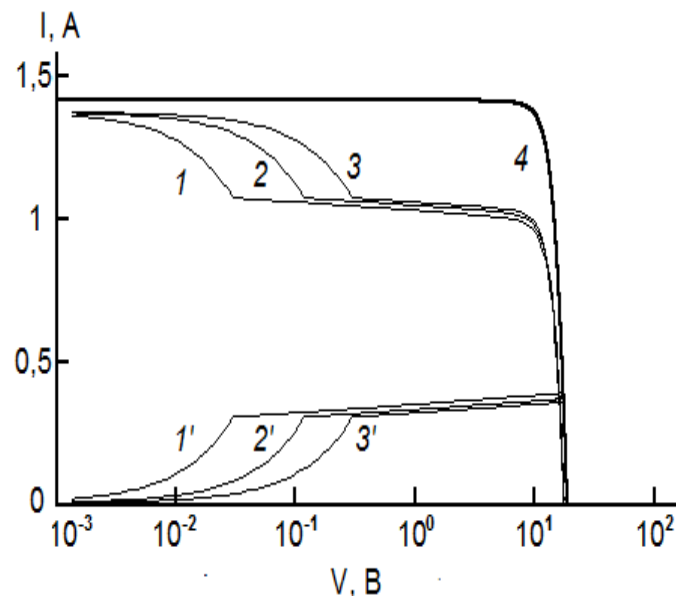
Table 1. Parameters of the elements of the model of a photovoltaic system.

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 фотозлектрической системы (рис. 1) с компонентами на основе элементов с типовыми параметрами, приведенными в табл. 1.

Параметр α в формуле (7) принимался равным 25.

Влияние величины сопротивления R_{Fu0} на вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики (ВВХ) исследуемой фотозлектрической системы показано на рис. 3 и 4.



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

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

Fig. 3. Current-voltage characteristics $I_L(V)$ (curves 1 - 4) and current dependencies through SRF $I_{Fu}(V)$ (I' - 3') of the simulated photovoltaic system in the presence of a short circuit of one of its components.

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_{Fu0} 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 фотозлектрических 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 Fu_n .

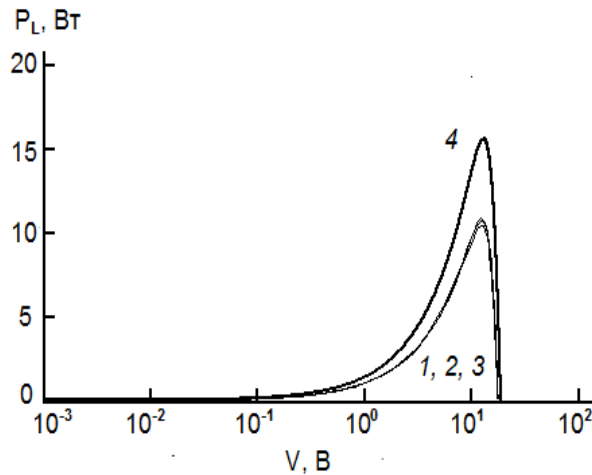


Рис. 4. Вольт-ваттные характеристики $P_L(V)$ моделируемой фотоэлектрической системы при наличии короткого замыкания одного из ее компонентов. Параметры и обозначения соответствуют принятым на рис. 3.

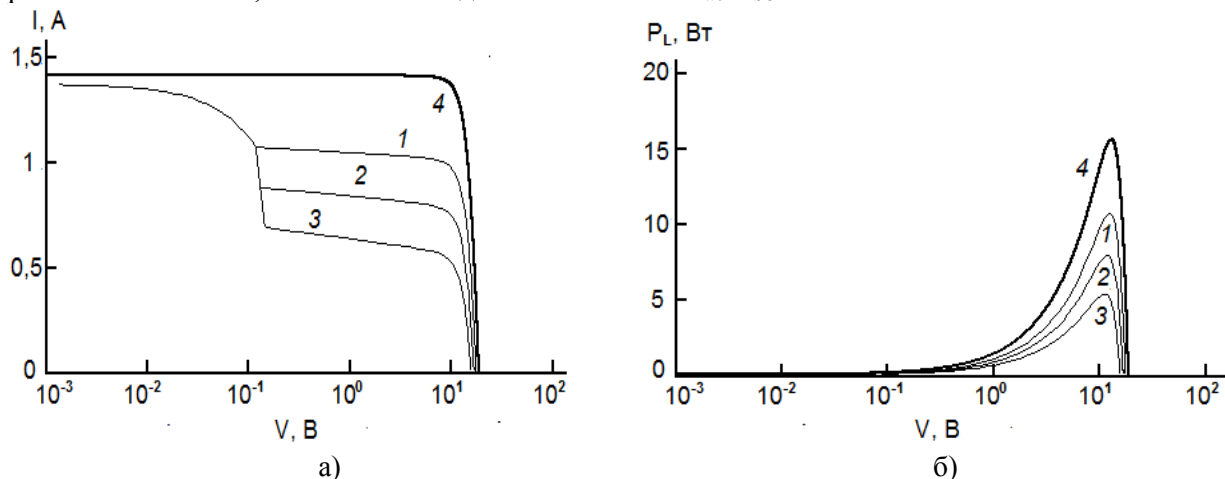
Fig. 4. Volt-Watt Characteristics $P_L(V)$ of the simulated photovoltaic system in the presence of a short circuit of one of its components. Parameters and designations correspond to those adopted in Fig. 3.

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

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. 5 а и б 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 со-

стоянии с высоким значением сопротивления. Уменьшение величины I_{Fu0} 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) фотоэлектрического компонента (ФЭМ или ФЭП), т.е. $I_{Fu0} > I_{SC}$.



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

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

Fig. 5. Volt-ampere (a) and volt-watt (b) characteristics of a simulated photovoltaic system during a short circuit of one of its components.

Следует также отметить, что потери производимой электрической энергии на работу предохранителя в рассматриваемой ситуации короткого замыкания одного из параллельно соединенных фотоэлектрических компонентов могут 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 проводящем 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.

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. Солнечные модули и батареи. United Solar Technologies. [Электронный ресурс]. URL: <http://ust.su/solar/media/section-inner17>. (дата обращения: 12.05.2019).

3. *Tonkoshkur A.S., Nakashidze L.V., Lyagushyn S.F.* Schemotechnical technologies for reliability of solar arrays. Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Дніпро. 2018. Вип. 4(117). С. 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. 2015. No. 5(5). 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). 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. *Тонкошкур А.С., Иванченко А.В., Накашидзе Л.В., Мазурик С.В.* Применение самовосстанавливающихся элементов для электрической защиты солнечных батарей. Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2018. № 1. С. 43-49.

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

12. *Каминская Т.П., Домкин К.И.* Самовосстанавливающиеся предохранители для автомобильной электроники. Электронные компоненты. 2008. № 5. С. 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: Littelfuse, Inc. 2017. [Электронный ресурс]. URL: http://www.littelfuse.com/~media/electronics/application_notes/littelfuse_protecting_rechargeable_li_ion_and_li_polymer_batteries_in_consumer_portable_electronics_application_note.pdf. (дата обращения: 10.05.2019).

15. *Левшиов А.В., Фёдоров А.Ю.* О математическом моделировании фотоэлектрических модулей. Наукові праці ДонНТУ. Серія Електротехніка і енергетика. 2013. № 1(14). С. 153-158.

16. *Раушенбах Г.* Справочник по проектированию солнечных батарей. Москва. 1983. 360 с.

17. *Lorenzo E.* Solar Electricity Engineering of Photovoltaic Systems. Artes Graficas Gala. Spain. 1994.

18. *Коваль О.С., Тиванов М.С.* Определение параметров солнечного элемента из его световой вольт-амперной характеристики. 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. International Journal of Mechanical Engineering (IJME). August 2014. Vol. 2. Issue 8. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ipasj.org/IJME/IJME.htm> (дата обращения: 10.05.2019).

20. *Alboteanu I.L., Ivanov S., Manolea G.* Modelling and simulation of a stand-alone photovoltaic system. 8 th WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS (PS 2008). Santander. Cantabria. Spain. September 23-25. 2008. 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. *Гаевский А.Ю.* Определение параметров фотоэлектрических модулей на основе точного решения уравнения для ВАХ. Відновлювальна енергетика. 2012. № 4. С. 32-39.

23. *Honsberg C., Bowden S.* Arisone State University. Solar Power Labs. [Электронный ресурс]. URL:

<http://www.pveducation.org/pvcdrom> (дата обращения: 10.04.2019).

24. Мэклин Э.Д. Терморезисторы. Москва. 1983. 208 с.

25. Тонкошкур О.С., Тростан О.Н., С'янов О.М. Компонентна база РЕА. Дніпродзержинськ. 2004. 240 с.

26. PolySwitch. Resettable Device Short Form Catalog. Tuco Electronics. Raychem circuit protection. May. 2005. [Электронный ресурс]. URL: <https://datasheet.octopart.com/MICROSMD010F-2-Tyco-Electronics-datasheet-45906.pdf> (дата обращения: 11.05.2019).

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. [in English]

2. Solnechnye moduli i batarei. [Solar modules and batteries]. United Solar Technologies. [Electronic resource]. URL: <http://ust.su/solar/media/section-inner17>. (Applying date: 12.05.2019). [in Russian].

3. Tonkoshkur A.S., Nakashidze L.V., Lyagushyn S.F. Schemotechnical technologies for reliability of solar arrays. Systemni tehnologiyi. Dnipr. 2018. Vyp. 4(117). Pp. 95-107. [in English].

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. [in English].

5. Kim K.A., Krein P.T. Reexamination of photovoltaic hot spotting to show inadequacy of the bypass diode. IEEE J. Photovoltaics. 2015. No. 5(5). Pp. 1435-1441. [in English].

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. [in English].

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. [in English].

8. Pacheco Sánchez F.J. Photovoltaic systems distributed monitoring for performance optimization. Doct. Thesis. Universidad de Málaga (RIUMA: riuma.uma.es). Málaga. España. 2015. [in English].

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. [in English].

10. Tonkoshkur A.S., Ivanchenko A.V., Nakashidze L.V., Mazurik S.V. Primenenie samovosstanavlivajushhiesja jelementov dlja jelektricheskoy zashhity solnechnyh batarei. [The use of self-healing elements for the electrical protection of solar cells]. Tehnologija i konstruirovaniye v jelektronnoj apparature. 2018. No. 1. Pp. 43-49. [in Russian].

11. Gavrikov V. Samovosstanavlivajushhiesja PTC-predohraniteli dlja zashhity ot tokovyh peregruzok. [Self-repairing PTC fuses for protection against current overloads]. Novosti Jelektroniki. 2014. No. 12. Pp. 11-15. [in Russian].

12. Kaminskaja T.P., Domkin K.I. Samovosstanavlivajushhiesja predohraniteli dlja avtomobilnoj jelektroniki. [Self-repairing fuses for automotive electronics]. Jelektronnye komponenty. 2008. No. 5. Pp. 80-82. [in Russian].

13. Oglesbee J.W., Burns A.G. Pat. 6608470 USA. Overcharge protection device and methods for lithium based rechargeable batteries. 19.08.03. [in English].

14. Protecting rechargeable Li-ion and Li-polymer batteries: Littelfuse, Inc. 2017. [Electronic resource].

URL: http://www.littelfuse.com/~media/electronics/application_notes/littelfuse_protecting_rechargeable_li_ion_and_li_polymerbatteries_in_consumer_portable_electronics_application_note.pdf. (Applying date: 10.05.2019). [in English].

15. Levshov A.V., Fjodorov A.Ju. O matematicheskom modelirovanii fotojelektricheskikh module. [About mathematical modeling of photovoltaic modules]. Naukovi praci DonNTU. Serija Elektrotehnika i energetyka. 2013. No. 1(14). Pp. 153-158. [in Russian].

16. Raushenbah G. Spravochnik po proektirovaniju solnechnyh batarei. [Handbook of Solar Design]. M. Jenergoatomizdat. 1983. 360 p. [in Russian].

17. Lorenzo E. Solar Electricity Engineering of Photovoltaic Systems. Artes Graficas Gala. Spain. 1994. [in English].

18. Koval O.S., Tivano M.S. Opredelenie parametrov solnechnogo elementa iz ego svetovoj volt-ampernoj karakteristiki. [Determination of parameters of a solar cell from its light current-voltage characteristic]. Vestnik BGU. 2012. Ser. 1. No. 2. Pp. 39-44. [in Russian].

19. Salem F.A. Modeling and Simulation issues on Photo Voltaic systems, for Mechatronics design of solar electric applications. International Journal of Mechanical Engineering (IJME). August 2014. Vol. 2. Issue 8. [Electronic resource]. URL: <http://www.ipasj.org/IJME/IJME.htm> (Applying date: 10.05.2019). [in English].

20. Alboteanu I.L., Ivanov S., Manolea G. Modelling and simulation of a stand-alone photovoltaic system. 8 th WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS (PS 2008). Santander. Cantabria. Spain. September 23-25. 2008. Pp. 189-194. [in English].

21. Hansen A.D., Sorensen P., Hansen L.H., Binder H. Models for a Stand-Alone PV System. Roskilde. 2000. 78 p. [in English].

22. Gaevskij A.Ju. Opredelenie parametrov fotojelektricheskikh modulej na osnove tochnogo reshenija uravnenija dlja VAH. [Determination of parameters of photovoltaic modules based on the exact solution of the equation for VAN]. Vidnovljuvena energetika. 2012. No. 4. Pp. 32-39. [in Russian].

23. Honsberg C., Bowden S. Arisone State University. Solar Power Labs. [Electronic resource]. URL: <http://www.pveducation.org/pvcdrom> (Applying date: 10.04.2019). [in English].

24. Mjeklin Je.D. Termorezistory. [Thermistors]. M. Radio i svjaz. 1983. 208 p. [in Russian].

25. Tonkoshkur O.S., Trystan O.N., S'janov O.M. Komponentna baza REA. [Component base of REA]. Dniprodzержynsk DDTU. 2004. 240 p. [in Ukrainian].

26. PolySwitch. Resettable Device Short Form Catalog. Tuco Electronics. Raychem circuit protection. May. 2005. [Electronic resource]. URL: <https://datasheet.octopart.com/MICROSMD010F-2-Tyco-Electronics-datasheet-45906.pdf> (Applying date: 11.05.2019). [in English].

ЗАСТОСУВАННЯ САМОВІДНОВЛЮЮТЬСЯ ЗАПОБІЖНИКІВ «POLYSWITCH» ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ СТРУМОВИХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ В ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ

О.С. Тонкошкур, докт. фіз.-мат. наук, професор,
Л.В. Накашідзе, докт. техн. наук, директор НДІ енергетики

Актуальність. Наявні 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 корот-

ких довжинах рядків ФЕП, що не застосовується в сучасній конструкції панелей з економічних міркувань. Тому необхідно підвищення надійності сонячних батарей, включаючи усунення нештатних (пожежонебезпечних) ситуацій на основі розробки методів і засобів запобігання струмових перевантажень в їх фотоелектричних системах на основі нових підходів.

Мета. Розробка універсального підходу для мінімізації струмових перевантажень в фотоелектричних системах сонячних батарей шляхом застосування недорогих елементів функціональної електроніки, зокрема, щодо нових і самовідновних запобіжників типу "Polyswith", що набули широкого розповсюдження.

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

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

Розроблено математичну модель схемного рішення і проведено моделювання його основних характеристик при використанні типових параметрів фотоелектричних перетворювачів на основі монокристалічного кремнію і комерційних самовідновних запобіжників. Проаналізовано вплив величини опору в провідному стані і струму спрацьовування СВІП на ВАХ і ВВХ паралельного з'єднання фотоелектричних компонентів сонячних батарей.

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 компоненту;
 - струм спрацьовування запобіжника повинен бути більшим струму короткого замикання окремого фотоелектричного компонента і меншим струму їх паралельного з'єднання.
- Бібл. 26, рис. 5, табл. 1.

Ключові слова: фотоелектричний перетворювач, струмові перевантаження, самовідновлюваний запобіжник, вольт-амперні характеристики, вольт-ватні характеристики, моделювання.

Стаття надійшла до редакції 11.06.19
Остаточна версія 02.06.20

НАБЛИЖАЄМО ЕНЕРГЕТИКУ МАЙБУТНЬОГО СЬОГОДНІ



**XIII МІЖНАРОДНА
СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА
ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ, ЕКОЛОГІЇ,
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ**

EcoEnergy Expo

10-12 листопада 2020

Технічний партнер: *Rent Media*



**МІЖНАРОДНИЙ
ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР**
Київ, Броварський проспект, 15
М "Лівобережна"

☎ (044) 201-11-57, 206-87-96
e-mail: lyudmila@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua