

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.2.04

УДК 621.311.243

И.М. Кирпичникова, И.Б. Махсумов

Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

**ПОСТРОЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ С УЧЕТОМ УСЛОВИЙ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Сокращение срока службы солнечных модулей при их эксплуатации происходит по разным причинам, одной из которых является их деградация из-за перегрева поверхностей в условиях работы при повышенных температурах воздуха. Стандартные вольт-амперные и мощностные характеристики солнечных модулей, указываемые производителем, определяют значения основных энергетических параметров и не всегда соответствуют внешним условиям, где работает данная солнечная энергоустановка. В связи с этим необходимо знать, насколько изменится генерация электроэнергии в реальных условиях эксплуатации. **Цель исследования:** разработать структурную схему расчета энергетических характеристик солнечных модулей с учетом внешних параметров, влияющих на их эффективную работу, и предусмотреть термозащиту модулей. **Результаты:** для решения поставленной цели были исследованы основные параметры солнечного модуля и окружающей среды. Установлено, что температурный коэффициент мощности зависит от условий окружающей среды, типа и качества материала солнечных модулей и определяет степень их деградации, а правильный выбор места установки модулей обеспечивает надежность и долговечность их работы. Предложено для поддержания эффективности работы солнечного модуля вблизи точки максимальной мощности использовать специальную голографическую пленку с функциями защиты поверхности от инфракрасных излучений. Были построены вольт-амперные и мощностные характеристики солнечного модуля при изменении температуры и применении термозащиты, проведено их сравнение со стандартными характеристиками производителя. Разработана структурная схема расчета энергетических характеристик солнечных модулей, показывающая, какие параметры необходимо учитывать при их выборе и необходимость использования термозащиты. **Практическая значимость:** составленная структурная схема расчета энергетических характеристик солнечных модулей в реальных условиях эксплуатации позволяет учесть все параметры, влияющие на эксплуатационные параметры модулей, и определить наиболее оптимальные условия их работы для максимального генерирования электроэнергии.

Ключевые слова: солнечная энергетика, эффективность работы модулей, температурный коэффициент мощности, энергетические характеристики, термозащита поверхности модуля.

I.M. Kirpichnikova, I.B. Makhsumov

South Ural State University (National Research University),
Chelyabinsk, Russian Federation

CONSTRUCTION OF ENERGY CHARACTERISTICS OF SOLAR MODULES TAKING INTO ACCOUNT THE ENVIRONMENT

The reduction of the life of solar modules during their operation occurs for various reasons, one of which is their degradation due to overheating of surfaces in operating conditions at elevated air temperatures. The standard current-voltage and power characteristics of solar modules, indicated by the manufacturer, determine the values of the main energy parameters and do not always correspond to the external conditions where this solar power plant works. In this regard, it is necessary to know how much the generation of electricity will change under real operating conditions. **Purpose of research:** to develop a structural scheme for calculating the energy characteristics of solar modules, taking into account external parameters that affect their effective operation. **Results:** to solve this goal, the basic parameters of the solar module and the environment were investigated. It has been established that the temperature coefficient of power depends on environmental conditions, the type and quality of the material of the solar modules and determines the degree of their degradation, and the correct choice of the installation location of the modules ensures the reliability and durability of their work. The volt-ampere and power characteristics of the solar module were built with a change in temperature, and they were compared with the standard characteristics of the manufacturer. It is proposed to maintain the efficiency of the solar module near the point of maximum power to use a special holographic film with the functions of protecting the surface from infrared radiation. Introduction to the structural scheme of calculating the energy parameters of the solar module of the thermal protection element will allow you to adjust the energy characteristics of the modules. **Practical relevance:** a compiled block diagram of calculating the energy characteristics of solar modules in real operating conditions allows you to take into account all the parameters that affect the operational parameters of the modules and determine the most optimal conditions for their operation for maximum power generation.

Keywords: solar energy, module performance, temperature power factor, energy characteristics, thermal protection of the module surface.

Введение. Одной из проблем, связанных с эксплуатацией солнечных электростанций в странах с жарким климатом, является перегрев поверхности фотоэлектрических преобразователей в процессе эксплуатации под действием повышенной температуры окружающей среды.

Известно, что только часть спектра солнечного излучения преобразуется в электричество, остальная рассеивается в виде тепла. Это тепло вызывает повышение температуры модуля, что приводит к снижению эффективности работы модуля и выходной мощности. Перегрев модулей ведет к их ускоренной деградации (примерно в два раза на каждые 10 градусов повышения температуры поверхности модуля) [1–5]. В результате теплопроводности, излучения и конвекции происходит теплообмен между модулем и окружающей средой, и установившийся тепловой баланс определяет рабочую температуру модуля.

Производители солнечных модулей указывают энергетические характеристики в паспортах своей продукции, которые соответствуют стандартным условиям эксплуатации STC (Standard Test Conditions). Эти условия предполагают получение выходных характеристик при температуре на поверхности модуля $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и освещенности 1000 Вт/м^2 при перпендикулярном падении солнечных лучей на поверхность модуля [6].

Вольт-амперные характеристики, полученные в таких условиях, производитель и указывает в паспортах своей продукции.

Реальные же условия эксплуатации далеко не всегда соответствуют условиям тестирования, и поэтому для потребителя встают вопросы, какова будет реальная генерация модулей и что необходимо учесть при выборе модулей. В связи с этим разработка структурной схемы определения энергетических характеристик солнечных модулей с учетом внешних параметров является актуальной задачей.

Вопросами снижения энергетических показателей солнечных модулей от перегрева занимаются в основном в странах, где такая проблема стоит наиболее остро [7–9].

Однако ВАХ и мощностные характеристики приводятся в общем виде, в них, как правило, не учитываются все факторы, способствующие подобному снижению мощности. Кроме того, если для солнечных модулей применить специальные защитные устройства от перегрева, можно увидеть, как в таком случае будут меняться их энергетические характеристики.

Целью данной работы является исследование влияния внешних параметров на эффективность работы модуля с учетом использования термозащиты модулей от перегрева. На основе полученных результатов была составлена структурная схема расчета энергетических параметров солнечного модуля в реальных условиях эксплуатации, которая может быть полезна при выборе солнечных модулей потребителями.

1. Факторы, влияющие на энергетические характеристики солнечных модулей. Фотоэлектрические элементы солнечных модулей нуждаются в соответствующих условиях эксплуатации, чтобы работать с приемлемой эффективностью и производить электрическую энергию без значительных потерь.

Значительное влияние на эффективность работы солнечных модулей (СМ) и максимальную выходную мощность всей солнечной батареи оказывает температура окружающей среды. Чем горячее панель,

тем меньше энергии она генерирует. Кроме температуры окружающей среды на работу СМ оказывают влияние температурный коэффициент мощности (ТКМ) и тип установки.

При повышении температуры на передней поверхности модуля падение напряжения становится больше, чем увеличение тока. Поэтому мощность модуля как произведение этих величин уменьшается и модуль работает с меньшей эффективностью. Температурный коэффициент мощности показывает, на сколько процентов снизится мощность устройства при повышении температуры на каждый градус относительно ее стандартного значения, равного 25 градусов.

Зависимость выходной мощности солнечного элемента P от температуры определяется как

$$P = P_0(1 + \beta \cdot \Delta T), \quad (1)$$

где P_0 – мощность фотоэлемента при стандартной температуре 25 °С, Вт; β – температурный коэффициент мощности, %/°С; ΔT – повышение температуры фотоэлемента, °С.

Значения ТКМ указываются производителями модулей, которые получают в ходе тестирования. Это означает, например, для модели с ТКМ = 0,4, что с каждым повышением температуры по отношению к стандартной выход мощности снижается на 0,4 %. Тогда при 40-градусной жаре мощность модуля может снизиться до 7 %. Во многих случаях солнечный элемент может нагреваться до 65 °С, в результате чего модуль становится менее эффективным и, следовательно, вырабатывает меньше энергии. Если бы панель с температурным коэффициентом $-0,4$ %/°С достигла экстремальной температуры 65 °С, это привело бы к снижению производительности на 26 % ($-0,4\% \cdot 65$). Однако здесь задействовано больше переменных, чем просто значение коэффициента, и уравнение немного сложнее.

В зависимости от типа применяемых кремниевых материалов ТКМ имеет значение от 0,2 %/°С (для аморфных тонкопленочных элементов) до 0,5 %/°С (для поликристаллических). Чем ближе температурный коэффициент к нулю, тем лучше модуль будет работать при повышенных температурах. В табл. 1. приведены значения температурного коэффициента мощности для некоторых моделей солнечных элементов.

Таблица 1

Значение температурного коэффициента мощности
для некоторых моделей солнечных модулей

Модель	Производитель	Тип	КПД, %	ТКМ, %/°С
НIT VBHN325SJ47	Panasonic	монокристалл	19,7	-0,29
LR6-72PE-360W PERC	Longi Solar	монокристалл	18,6	-0,38
PLM-260P-60	Perlight Solar	поликристалл	15,99	-0,45
TR660P-275W	Talesun	поликристалл	16,9	-0,4
SF165-S	Solar Frontier	тонкопленочный	13,44	-0,31

Как видно из таблицы, ТКМ зависит от качества фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Качество ФЭП также определяет степень деградации панелей. Из данных по эксплуатации СМ известно, что монокристаллические панели деградируют быстрее, чем поликристаллические, и за год эксплуатации их мощность снижается на 3 % в сравнении с 2 % у поликристаллов. Обычно это происходит в первые годы эксплуатации, затем деградация составляет соответственно 0,71 и 0,67 % [3, 10]. Поэтому очень важно соблюдать условия эксплуатации солнечных энергоустановок, защищая их от перегрева.

Тип солнечного модуля и его качество определяют температуру нагрева его поверхности. Все солнечные модули по качеству исполнения делятся на следующие категории (табл. 2).

Таблица 2

Качество фотоэлектрических преобразователей

Номер категории	Обозначение	Характеристика
I	Grad A	Самое высокое качество ФЭП, внешняя целостность, без сколов и микротрещин, высокий КПД и малая степень деградации
II	Grad B	Качество хорошее, имеются изменения в цвете, отсутствие сколов и трещин, большая деградация и меньший срок эксплуатации
III	Grad C	Наличие сколов и трещин, неоднородный цвет, низкий КПД и низкая стоимость
IV	Grad D	Самое низкое качество, структура неоднородна, с видимыми дефектами, небольшая надежность и малая стоимость

Модули хорошего качества могут работать в диапазоне температур $-40 + 90$ °С. Однако после 15 лет эксплуатации выработка электроэнергии ими может снизиться на 10 %, а после 20 лет – на 20 % [11].

Для повышения надежности и долговечности модулей иногда используется прозрачная пленка EVA, которая размещается на передней стороне модуля между солнечными элементами и стеклом, защищает его от механических повреждений, снижая тем самым деградацию модуля. Качественная пленка может служить до 30 лет, при этом ее помутнение и старение могут снижать мощность модуля до 25–3 %. Некачественная пленка уже через 3–5 лет начинает желтеть, разрушаться и отслаиваться, вызывая преждевременное старение модуля [12].

Для изоляции обратной стороны панелей от загрязнений, влаги и механических повреждений используется другой тип пленки полиэтилентерефталата – ПЭТ, качество которой тоже может быть различным. При использовании качественной пленки влага, попадающая в результате диффузии внутрь модуля, выводится наружу при его нагревании. Если пленка некачественная, то часть невыведенной влаги остается внутри модуля, разрушает контакты и приводит к сокращению срока эксплуатации модуля [13].

Срок эксплуатации солнечных модулей во многом зависит от правильного выбора места их установки. Если модули установлены на крыше, они испытывают гораздо более высокие температуры, чем текущая температура окружающей среды.

Кроме того, если это будет кровля здания темного цвета, то при ее быстром нагреве от солнца она начинает переизлучать тепло на солнечные панели. Материал крыши также оказывает влияние на температурный баланс модулей. Известно, что такие материалы, как шифер, металлочерепица, битумная крыша, нагреваются быстро и долго остывают.

Модули, которые закреплены параллельно крыше, практически не пропускают воздушный поток между крышей и панелью, являются наименее эффективными и испытывают наибольший рост температуры (35 °С). Типичная установка в стойку допускает зазор более 150 мм между поверхностью крыши и панелью, что позволяет воздушному потоку оказывать охлаждающее воздействие на панель. Этот тип установки более эффективен, чем установка, закрепленная параллельно крыше, и обычно приводит к повышению температуры панели

на 30 °С. Тем не менее лучший вариант – это когда солнечная панель установлена на стойке в отдельно стоящей раме (25 °С). Каждый из этих типов установки влияет на температуру модуля и, следовательно, на его производительность [14].

Электрические процессы, происходящие в солнечных элементах, как и в любом другом электронном оборудовании, подчиняются законам термодинамики. Повышение температуры в солнечном элементе вызывает уменьшение ширины запрещенной зоны кремниевого материала, при этом ток насыщения будет увеличиваться, так как для образования электронно-дырочных пар требуется меньше энергии. Однако увеличение тока будет незначительным, а уменьшение напряжения и, следовательно, уменьшение выходной мощности, будет более заметным. Это можно наблюдать на вольт-амперной (ВАХ) и мощностной, или вольт-ваттной (ВВХ) характеристиках солнечного модуля.

Солнечный элемент (СЭ), который является ячейкой модуля, можно представить в виде следующей схемы замещения (рис. 1).

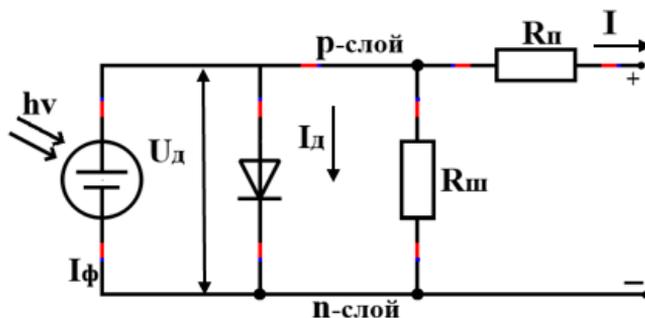


Рис. 1. Схема замещения солнечного элемента

На рис. 1 показано: I_{ϕ} – фототок; R_{π} – последовательное сопротивление солнечного элемента; R_{\parallel} – параллельное сопротивление солнечного элемента; I_d – прямой ток через p - n -переход (диод); U_d – напряжение на диоде. Значение тока I_{ϕ} определяется характеристиками солнечного потока и оптическими параметрами материала солнечного элемента.

В табл. 3. приведены технические данные солнечного модуля, для которого далее произведен расчет энергетических характеристик. Технические характеристики фотоэлектрического модуля типа Delta SM 100-24M производства Delta battery при стандартных условиях испытаний (STC): 25 °С, 1000 Вт/м² [15].

Таблица 3

Технические характеристики фотоэлектрического модуля типа Delta SM 100-24M производства Delta battery при стандартных условиях испытаний (STC) [15]

№ п/п	Наименование параметров	Обозначение	Значение параметров
1	Пиковая электрическая мощность	P_{max}	100 Вт
2	Напряжение в точке максимальной мощности	U_{mp}	18,78 В
3	Ток в точке максимальной мощности	I_{mp}	5,34 А
4	Ток короткого замыкания	I_{sc}	5,70 А
5	Напряжение холостого хода	U_{oc}	22,64 В
6	Температурный коэффициент по току	K_I	0,040 %/°C
7	Температурный коэффициент по напряжению	K_u	-0,380 %/°C
8	КПД фотоэлектрического модуля	η	17,96 %
9	Размер	Д×Ш×В	1470×670×35 мм
10	Стандартные условия испытаний	(STC)	1000 W/m ² ; AM 1,5; 25 +/-2 °C
11	Количество солнечных элементов	(9×4)	36

Температурный коэффициент по напряжению K_u в соответствии с табл. 3 равен -0,380 %/°C и является отрицательным. Так как 36 ячеек солнечного модуля соединены последовательно, он имеет большое суммарное значение. С другой стороны, температурный коэффициент по току K_I является положительным и небольшим – около 0,040 %/°C. Поэтому при практических расчетах допускается учитывать только изменение напряжения в зависимости от температуры [16].

Тогда для отдельного модуля, состоящего из n последовательно соединенных солнечных элементов, устанавливается значение 0,380 %/°C. Важно отметить, что напряжение определяется рабочей температурой этих элементов, которая отличается от температуры окружающей среды.

Ток короткого замыкания I_{sc} солнечного модуля пропорционален освещенности и поэтому будет изменяться в течение дня. При этом напряжение от интенсивности излучения будет меняться по логарифмическому закону [17].

Работа солнечного модуля должна находиться как можно ближе к точке максимальной мощности. Важной особенностью характеристики модуля является то, что напряжение в точке максимальной мощности U_{mp} не зависит от интенсивности излучения. Среднее значение этого напряжения в течение дня может быть оценено как 80 % напряжения холостого хода при стандартных условиях освещения.

При построении ВАХ солнечного модуля необходимо учитывать нормальную рабочую температуру солнечного элемента ($T_{н.сэ}$), т.е. температуру, когда модуль работает в следующих условиях в разомкнутой цепи [16]:

- поступление радиации 800 Вт/м^2 ;
- спектр излучения АМ 1,5;
- температура окружающей среды $+20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- скорость ветра более 1 м/с .

Нормальная рабочая температура ячейки $T_{н.сэ}$ обычно равна $42...46 \text{ }^\circ\text{C}$ и учитывается при определении температуры солнечного элемента $T_{сэ}$ во время работы модуля. Обычно предполагается, что разность между $T_{сэ}$ и температурой окружающей среды T_{oc} линейно зависит от освещенности E [16].

Выходная мощность фотоэлектрического модуля также зависит от температуры и освещенности.

С учетом вышеприведенных условий и характеристик модуля определим вид ВАХ и мощностной характеристики при изменении (повышении) температуры окружающей среды.

1. Ток короткого замыкания при конкретном поступлении солнечной радиации местности.

$$I_{к.з} = I_{sc} \cdot E, \quad (2)$$

где I_{sc} – значение тока короткого замыкания по характеристикам производителя, А; E – средняя освещенность (поступление солнечной радиации) для рассматриваемой местности, Вт/м^2 .

Из выражения (2) следует, что $I_{к.з}$ практически не зависит от температуры окружающей среды.

2. Температура солнечного элемента.

$$T_{сэ} = T_{oc} + \frac{E(T_{н.сэ} - 20)}{0,8}, \text{ }^\circ\text{C}, \quad (3)$$

где T_{oc} – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$; $T_{н.сэ}$ – нормальная рабочая температура солнечного элемента, $^\circ\text{C}$; 20 – температура окружаю-

щей среды, соответствующая нормальной рабочей температуре СЭ, °С; 0,8 – освещенность, при которой солнечный модуль работает в нормальных условиях, кВт/м².

Температура солнечного элемента определяется условиями окружающей среды, в частности, температурой, влажностью, скоростью ветра, поступлением солнечной радиации и др.

3. Напряжение холостого хода.

$$U_{x.x} = U_{o.c} - [0,0023T_{o.c} (T_{cэ} - 25)], \quad (4)$$

где $U_{o.c}$ – напряжение холостого хода, указанное производителем, В; 25 – стандартная температура тестирования модуля, °С.

Уравнение (4) показывает, что в процессе эксплуатации напряжение значительно зависит от температуры окружающей среды и нагрева солнечных элементов.

4. Максимальное (пиковое) значение выходной мощности, Вт, с учетом $T_{o.c}$ и E .

$$P_P = I_{к.з} \cdot U_{x.x} \cdot F_{мм}, \quad (5)$$

где $F_{мм}$ – точка максимальной мощности находится из предположения, что коэффициент заполнения модуля солнечными элементами не зависит от $T_{o.c}$ и E .

$$F_{мм} = \frac{P_{max}}{U_{o.c} \cdot I_{sc}}, \quad (6)$$

где P_{max} – пиковая электрическая мощность по данным производителя, Вт.

2. Построение энергетических характеристик солнечного модуля для реальных условий эксплуатации. Нами было предложено использование голографических структурированных пленок в качестве термозащиты, и была проведена серия экспериментов в условиях высоких температур местности. Предлагаемая термозащита отражает инфракрасные лучи солнечного спектра, снижая тем самым температуру поверхности солнечного модуля. Результаты проведенного эксперимента описаны в статьях [18–22] и показали, что использование пленки снижает температуру поверхности в среднем на 2–3 градуса.

С учетом данного фактора в соответствии с уравнениями (2)–(6) были рассчитаны энергетические характеристики солнечного модуля Delta SM 100-24М при температуре окружающей среды 35, 45 и 55 градусов. Результаты расчета представлены в табл. 4.

Таблица 4

Расчетные данные для построения энергетических характеристик солнечного модуля

№ п/п	$T_{o.c.}, ^\circ C$	$T_{c3}, ^\circ C$	$U_{x.x.}, B$	$P_p, Bт$
1	35	58	19,99	70,18
2	45	68	18,2	63,9
3	55	78	15,94	55,79

Расчеты подтверждают, что повышение температуры негативно отражается на выходной мощности солнечного модуля и может снизить ее значение до 50 % и более.

На рис. 2 представлены ВАХ-характеристики солнечного модуля Delta SM 100-24M при стандартной температуре (25 °C) и повышенных температурах с использованием термозащиты. Аналогичные мощностные характеристики модуля показаны на рис. 3.

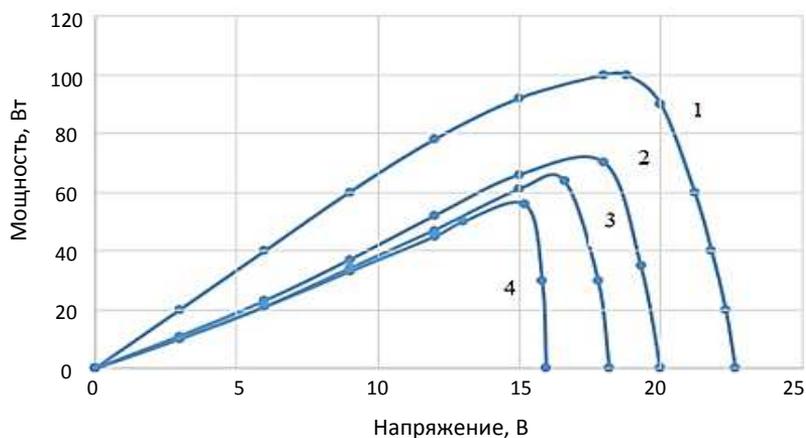


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики солнечного модуля при различных температурах окружающей среды:
 1 – при стандартной (25 °C); 2 – при температуре 35 °C;
 3 – при температуре 45 °C; 4 – при температуре 55 °C

Таким образом, характеристики солнечных модулей от завода-изготовителя отличаются от характеристик в реальных условиях эксплуатации. Для того чтобы эта разница была минимальной и работа солнечного модуля была эффективной вблизи точки максимальной мощности, необходимо предусмотреть термозащиту поверхности мо-

дулей от перегрева. Термозащитная голографическая пленка имеет хорошие эксплуатационные характеристики и защищает модуль не только от перегрева, но и от механических повреждений.

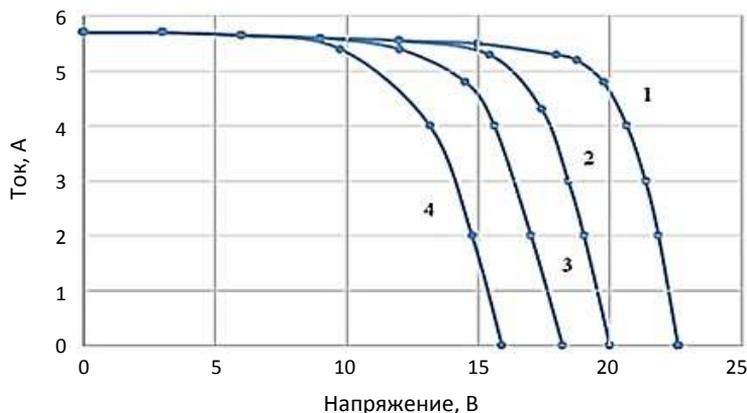


Рис. 3. Мощностные характеристики солнечного модуля:
 1 – при стандартной температуре (25 °С); 2 – при температуре 35 °С;
 3 – при температуре 45 °С; 4 – при температуре 55 °С

Структурная схема определения энергетических характеристик с термозащитой в условиях эксплуатации будет выглядеть следующим образом (рис. 4).

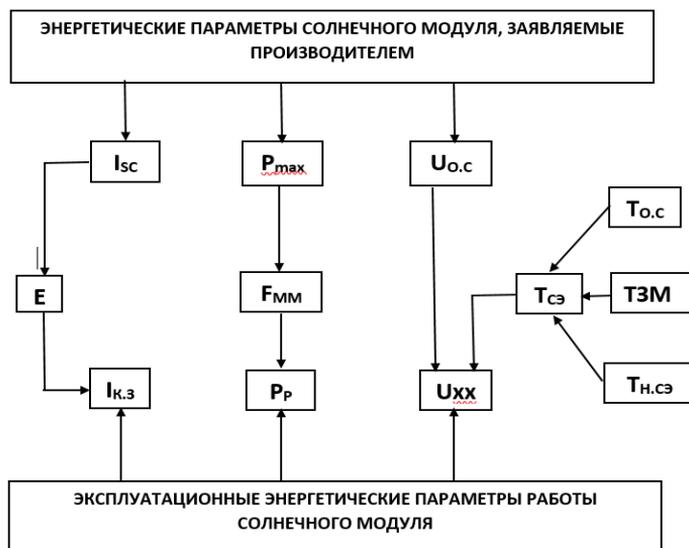


Рис. 4. Структурная схема определения энергетических параметров солнечного модуля

В разработанной структурной схеме построения энергетических характеристик термозащита модуля представлена блоком ТЗМ. Она является дополнительным параметром, влияющим на температуру солнечного элемента, и ее применение определяется потребителем в зависимости от условий окружающей среды.

С учетом положительного эффекта голографической пленки для снижения температуры поверхности модуля дальнейшим направлением исследований станет разработка внутренней структуры (рисунка) голограммы для повышения эффекта отражения тепловых лучей и концентрации солнечных лучей видимого диапазона электромагнитного излучения.

Выводы

1. Работа солнечных модулей в условиях повышенных температур ведет к их ускоренной деградации и негативно отражается на его энергетических характеристиках. Для правильного выбора модуля необходимо знать, насколько изменится генерация электроэнергии в реальных условиях эксплуатации.

2. Выходная мощность солнечного элемента определяется температурным коэффициентом мощности, который зависит от типа применяемых кремниевых материалов, их качества и способа размещения модулей.

3. Ток короткого замыкания солнечного элемента, который определяется поступлением солнечной радиации, практически не зависит от температуры окружающей среды, а напряжение холостого хода зависит от нее значительно, что может привести к снижению выходной мощности солнечного модуля до 50 % и более.

4. Учет внешних факторов при построении ВАХ и мощностных характеристик показал, что они значительно отличаются от аналогичных характеристик завода-изготовителя. Для поддержания эффективности работы солнечного модуля вблизи точки максимальной мощности необходимо предусмотреть термозащиту поверхности модуля.

5. Разработанная структурная схема расчета энергетических характеристик солнечных модулей в реальных условиях эксплуатации с использованием термозащиты позволяет учесть все параметры, влияющие на эксплуатационные параметры модулей, и определить наиболее оптимальные условия их работы для максимального генерирования электроэнергии.

Библиографический список

1. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar engineering of thermal processes. – New York: John Wiley & Sons; 2013.
2. Roslan E., Hassim I. Solar PV system with pulsating heat pipe cooling // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2019. – Vol. 14, no. 1. – P. 311–318. DOI: <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v14.i1.pp311-318>
3. Odeh S., Behnia M. Improving Photovoltaic Module Efficiency Using Water Cooling // Heat Transfer Engineering. – 2009. – Vol. 30, no. 6. – P. 499–505. DOI: 10.1080/01457630802529214
4. Moharram K.A., Abd-Elhady M.S., Kandil H.A., El-Sherif H. Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling // Ain Shams Engineering Journal. – 2013. – Vol. 4, no. 4. – P. 869–877. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2013.03.005>
5. Comparative study of water film heat exchangers for cooling photovoltaic panels / G.P. Catalin, S.V. Hudişteanua, T.D. Mateescua, N.C. Cherecheşa // Sustainable Solutions for Energy and Environment, EENVIRO – YRC 2015; 18–20 November 2015. – Bucharest, Romania, Energy Procedia. – 2015. – Vol. 85. – P. 365–370.
6. Что такое STC и PTC? [Электронный ресурс]. – URL: https://www.solarhome.ru/basics/solar/pv/ptc_conditions.htm/ (дата обращения: 17.05.2020).
7. Effect of Air Mass Environmental Parameter on Photovoltaic Performance / Slafa I. Ibrahim, Amerah A. Radhi, Khaleel I. Abass, Aedah M.J. Mahdi // International Journal of Trend in Research and Development. – 30 August 2019. – Vol. 6, no. 4. – P. 50–54. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/334836637>
8. Impact of Some Environmental Variables with Dust on Solar Photovoltaic (PV) Performance: Review and Research Status / Zeki Ahmed Darwish, Hussein A Kazem, K. Sopian, M.A. Alghoul, Miqdam T. Chaic // International Journal of Energy and Environment. – January 2013. – Vol. 7, no. 4. – P. 152–159. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/258051333>
9. Hussam Saad, Amani Ibraheem Al-Tmimi. Simulating the Performance of Solar Panels in Iraq // Research Article – Solar Energy. Journal of Applied and Advanced Research. – 2019. – Vol. 4, no. 1. – P. 6–10. – URL: <http://dx.doi.org/10.21839/jaar.2019.v4i1.264>

10. Degradation of multicrystalline silicon solar cells and modules after illumination at elevated temperature / K. Friederike, P. Engelhart, P. Hans-Christoph, A. Stekolnikov [et al.] // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. – 2015. – Vol. 142. – P. 83–86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.06.015>

11. Электрика в доме: Характеристики солнечных панелей [Электронный ресурс]. – URL: <http://electricavdome.ru/xarakteristiki-solnechnyx-batarej.html> (дата обращения: 10.01.2020).

12. Со светом [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sosvetom.ru/articles/prozrachnye-solnechnye-batarei-po-nastoyaschemu-solnechnye-batarei/> (дата обращения: 17.05.2020).

13. RealSolar. Как определить качество солнечных батарей? [Электронный ресурс]. – URL: <https://realsolar.ru/article/solnechnye-batarei/kak-opredelit-kachestvo-solnechnyh-batarey/> (дата обращения: 17.05.2020).

14. The Effect of Temperature on Solar Panel Performance [Электронный ресурс]. – URL: <https://solarcalculator.com.au/solar-panel-temperature/> (дата обращения: 12.01.2020).

15. Delta Battery. Официальный партнер [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.delta-battery.ru/solar/delta-sm/sm-poli/Delta-SM-100-12-P/> (дата обращения: 12.01.2020).

16. Dr. Boris Berkovski Solar Electricity. Second Edition // *Unesco Energy Engineering Series. Energy Engineering Learning Package*, 2001.

17. Гульков В.Н., Колесниченко И.Д., Коротков К.Е. Исследование влияния нагрева солнечных модулей на эффективность преобразования излучения // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. – 2019. – № 1. – С. 10–16.

18. Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б. Исследование температуры поверхности солнечных модулей с использованием голографической защиты от перегрева // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. – 2019. – Т. 15, № 4. – С. 19–29.

19. Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B. Investigation of Surface Temperature of Solar Modules Using Holographic Overheating Protection // *IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)*. – 2019. – P. 80–84. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEAMI.2019.8915414>

20. Study of the Operation of Solar Modules Using Holographic Thermal Protection / I.M. Kirpichnikova, I.B. Makhsumov, Zh. Madiyar, I.T. Abdulloev, Kh.D. Boboev, P.M. Shonazarov // *International*

Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2019). – 2019. – Vol. 140. – P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914011010>

21. Kirpichnikova I.M., Makhsufov I.B. Calculation of gross, technical and economic potential of solar energy of the Republic of Tajikistan // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). – 2019. – P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICOECS46375.2019.8949954>

22. Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б. Повышение энергетической эффективности работы солнечных модулей за счет снижения температуры поверхности // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2020. – Вып. 2. – С. 489–499.

References

1. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar engineering of thermal processes. New York: John Wiley & Sons; 2013.

2. Roslan E., Hassim I. Solar PV system with pulsating heat pipe cooling. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2019, vol. 14, no. 1, pp. 311-318. DOI: <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v14.i1.pp311-318>

3. Odeh S., Behnia M. Improving Photovoltaic Module Efficiency Using Water Cooling. *Heat Transfer Engineering*, 2009, vol. 30, no. 6, pp. 499–505. DOI: 10.1080/01457630802529214

4. Moharram K.A., Abd-Elhady M.S., Kandil H.A., El-Sherif H. Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling. *Ain Shams Engineering Journal*, 2013, vol. 4, no. 4, pp. 869-877. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2013.03.005>

5. Catalin G.P., Hudişteanua S.V., Mateescua T.D., Cherecheşa N.C. Comparative study of water film heat exchangers for cooling photovoltaic panels. *Sustainable Solutions for Energy and Environment, EENVIRO - YRC 2015*, 18-20 November 2015, Bucharest, Romania, Energy Procedia, 2015, vol. 85, pp. 365-370.

6. Chto takoe STC i PTC? [What are STC and PTC?], available at: https://www.solarhome.ru/basics/solar/pv/ptc_conditions.htm/ (accessed 17 May 2020).

7. Slafa I. Ibrahim, Amerah A. Radhi, Khaleel I. Abass, Aedah M.J. Mahdi. Effect of Air Mass Environmental Parameter on Photovoltaic Performance. *International Journal of Trend in Research and Development*, 30 August 2019, vol. 6, no. 4, pp. 50-54, available at: <https://www.researchgate.net/publication/334836637>

8. Zeki Ahmed Darwish, Hussein A Kazem, K. Sopian, M.A. Alghoul, Miqdam T. Chaic. Impact of Some Environmental Variables with Dust on Solar Photovoltaic (PV) Performance: Review and Research Status. *International Journal of Energy and Environment*, January 2013, vol. 7, no. 4, pp. 152-159, available at: <https://www.researchgate.net/publication/258051333>

9. Hussam Saad, Amani Ibraheem Al-Tmimi. Simulating the Performance of Solar Panels in Iraq. *Research Article - Solar Energy. Journal of Applied and Advanced Research*, 2019, vol. 4, no. 1, pp. 6-10, available at: <http://dx.doi.org/10.21839/jaar.2019.v4i1.264>

10. Friederike K., Engelhart P., Hans-Christoph P., Stekolnikov A. et al. Degradation of multicrystalline silicon solar cells and modules after illumination at elevated temperature. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2015, vol. 142, pp. 83-86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.06.015>

11. ElektriKa v dome: Karakteristiki solnechnykh panelei [Home Electrical: Solar Panel Features], available at: <http://electricavdome.ru/karakteristiki-solnechnyx-batarej.html> (accessed 10 January 2020).

12. Со светом [With light], available at: <https://www.sosvetom.ru/articles/prozrachnye-solnechnye-batarei-po-nastoyaschemu-solnechnye-batarei/> (accessed 17 May 2020).

13. RealSolar. Kak opredelit' kachestvo solnechnykh batarei? [RealSolar. How to determine the quality of solar panels?], available at: <https://realsolar.ru/article/solnechnye-batarei/kak-opredelit-kachestvo-solnechnykh-batarei/> (accessed 17 May 2020).

14. The Effect of Temperature on Solar Panel Performance, available at: <https://solarcalculator.com.au/solar-panel-temperature/> (accessed 12 January 2020).

15. Delta Battery. Ofitsial'nyi partner [Delta Battery. Official partner], available at: <https://www.delta-battery.ru/solar/delta-sm/sm-poli/Delta-SM-100-12-P/> (accessed 12 January 2020).

16. Dr. Boris Berkovski Solar Electricity. Second Edition. *Unesco Energy Engineering Series. Energy Engineering Learning Package*, 2001.

17. Gul'kov V.N., Kolesnichenko I.D, Korotkov K.E. Issledovanie vliianiia nagreva solnechnykh modulei na effektivnost' preobrazovaniia izlucheniia [Investigation of the effect of heating solar modules on the efficiency of radiation conversion]. *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo elektrotekhnicheskogo universiteta "LETI"*, 2019, no. 1, pp. 10-16.

18. Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B. Issledovanie temperatury poverkhnosti solnechnykh modulei s ispol'zovaniem golograficheskoi zashchity ot peregreva [Investigation of surface temperature of solar modules using holographic overheating protection]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy*, 2019, vol. 15, no. 4, pp. 19-29.

19. Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B. Investigation of Surface Temperature of Solar Modules Using Holographic Overheating Protection. *IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)*, 2019, pp. 80-84. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEAMI.2019.8915414>

20. Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B., Madiyar Zh., Abdulloev I.T., Boboev Kh.D., Shonazarov P.M. Study of the Operation of Solar Modules Using Holographic Thermal Protection. *International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2019)*, 2019, vol. 140, pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914011010>

21. Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B. Calculation of gross, technical and economic potential of solar energy of the Republic of Tajikistan. *International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, 2019, pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICOECS46375.2019.8949954>

22. Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti raboty solnechnykh modulei za schet snizheniia temperatury poverkhnosti [Increasing energy efficiency of work of solar modules by decreasing surface temperature]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2020, iss. 2, pp. 489-499.

Сведения об авторах

Кирпичникова Ирина Михайловна (Челябинск, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» Южно-

Уральского государственного университета (Национальный исследовательский университет) (454080, Челябинск, пр. Ленина, 76, e-mail: kirpichnikovaim@susu.ru).

Махсумов Илхом Бурхонович (Челябинск, Россия) – аспирант кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» Южно-Уральского государственного университета (Национальный исследовательский университет) (454080, Челябинск, пр. Ленина, 76, e-mail: messi.ilhom@gmail.com).

About the authors

Kirpichnikova Irina Mikhailovna (Chelyabinsk, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electric Stations, Networks and Power Supply Systems South Ural State University (National Research University) (454080, Chelyabinsk, 76, Lenina ave., e-mail: kirpichnikovaim@susu.ru).

Makhsumov Ilkhom Burkhonovich (Chelyabinsk, Russian Federation) is a Graduate Student of the Department Power plants, networks and power supply systems South Ural State University (National Research University) (454080, Chelyabinsk, 76, Lenina ave., e-mail: messi.ilhom@gmail.com).

Получено 06.04.2020