



Критерий оценки полноспектральных модулей для солнечной энергетики

Е. А. Ионов¹, К. А. Овчинников², Д. А. Малевский¹

¹ ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Использование высокоэффективных (КПД > 40%) полноспектральных солнечных элементов в наземной солнечной энергетике сопряжено с усложнением конструкции солнечной электростанции, что может привести к возрастанию капитальных затрат, не покрываемых увеличением энерговыработки. Предложено использовать относительный LCOE (средневзвешенная себестоимость электроэнергии, англ. – *Levelised Cost of Energy*) как критерий, позволяющий оценить конкурентоспособность электростанции на начальном этапе ее разработки. Показано, что конкурентоспособность электростанции с полноспектральными солнечными элементами в географической точке (51 с. ш, 108 в. д.) будет обеспечена в случае, если капитальные затраты в расчете на 1 м² апертюры модуля не более чем в 1,9 раз превышают капитальные затраты на 1 м² сравниваемого кремниевого модуля.

Ключевые слова: солнечная электростанция, LCOE (средневзвешенная себестоимость электроэнергии, англ. – *Levelised Cost of Energy*), солнечный элемент

Статья получена: 26.02.2025

Статья принята: 26.04.2025

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная энергетика включает в себя генерирующие объекты малой мощности, которые могут рассматриваться как часть распределенной энергетики. В рамках данной концепции развития отрасли централизованная система дополня-

Evaluation Criterion of Full-Spectrum Modules for Solar Power Engineering

E. A. Ionova¹, K. A. Ovchinnikov², D. A. Malevskiy¹

¹ Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

The use of highly efficient (efficiency > 40%) full-spectrum solar cells in the ground-based solar power engineering is associated with the sophisticated design of the solar power plant that can lead to the increased capital costs not covered by the boosted energy yield. It is proposed to use the relative LCOE (*Levelised Cost of Energy*) as a criterion for evaluating the competitiveness of a power plant with full-spectrum solar cells at its initial stage of development. It is shown that if the power plant is located at the geographic point with the coordinates (51N, 108E), the power plant competitiveness with full-spectrum solar cells shall be ensured already when the capital costs per 1 m² of the module aperture exceed the capital costs per 1 m² by no more than 1.9 times in comparison with a silicon module.

Key words: solar power plant, solar cell, multi-junction solar cell, power generation, efficiency, LCOE (*Levelised Cost of Energy*)

Article received: February 26, 2025

Article accepted: April 26, 2025

INTRODUCTION

The solar power engineering includes the low-power generating facilities that can be considered as a part of distributed power generation. Within the framework of this industrial development concept, the centralized system is supplemented by the energy production close to its consumers. The distributed electric power industry can be related to the smart power transmission networks that allow for prompt changes in the current specifications in the electric network, while reducing the energy

ется генерацией энергии вблизи от ее потребителей. Распределенная электроэнергетика может быть связана с активно-адаптивными («умными») сетями передачи электроэнергии, позволяющими оперативно менять характеристики тока в электрической сети, снижая энергозатраты за счет перераспределения нагрузки между источниками. Активно-адаптивные сети позволят встроить в энергетическую солнечные электростанции (СЭС), характеризующиеся большим разбросом как по значениям установленной мощности – от нескольких КВт до десятков МВт, так и по энерговыработке в течение суток, обеспечивая их функционирование в централизованной системе или в изолированном режиме [1-2].

В настоящее время уже существуют или находятся на заключительных этапах разработки [3-6] солнечные элементы (СЭ) с несколькими (3-6) активными р-п-переходами с совокупным спектральным интервалом фотоответа 380–1850 нм. Они поглощают солнечный спектр в его энергетическом наполнении практически полностью, в отличие от кремниевых (СЭ), работающих в интервале спектра 350–1100 нм, и других СЭ с еще более узким интервалом фотоответа. И хотя КПД СЭ только отчасти зависит от интервала спектрального отклика, многопереходные СЭ имеют самый большой КПД – 40% и выше, продолжаются работы по дальнейшему его увеличению. Модули на основе таких многопереходных СЭ в дальнейшем будем называть полноспектральными модулями (ПСМ), используя этот признак как определяющий.

Проблематика использования СЭС на основе ПСМ в солнечной энергетике для реализации преимуществ их высокого КПД представляет не только практический, но и научный интерес, так как ПСМ имеют значительные отличия от кремниевых и других солнечных батарей. Да и выход на рынок СЭС на основе ПСМ будет отличаться: хотя бы тем, что свое место в нем потребуются «завоевывать» за счет своих конкурентных преимуществ.

Особенность СЭС на основе ПСМ состоит в том, что они практически всегда включают в себя оптическое концентрирование солнечного излучения и слежение за положением Солнца. Специфичность проявляется и из-за самих процессов концентрирования и слежения, которые протекают одновременно с генерированием электроэнергии, и из-за наличия соответствующих конструктивных элементов (см. рисунок).

Слежение необходимо из-за концентрирования прямого солнечного излучения на поверхность многопереходных СЭ, а концентрирование необ-



Рис. 1. Прототип СЭС с восемью ПСМ с установленной мощностью 1–2 КВт. Концентрирование солнечного излучения обеспечивается панелью линз Френеля, двухосевое слежение за Солнцем обеспечивается следящей опорой [7, 8]

Fig. 1. A prototype solar power plant with eight FSMs and an installed capacity of 1–2 kW. Concentration of solar radiation is provided by a Fresnel lens panel, and the two-axis Sun tracking process is provided by a tracking support [7, 8].

costs by the load redistribution between the sources. The smart networks shall allow for the integration of solar power plants (SPP) into the power engineering sector specified by a wide range of both installed capacity values (from several kW to tens of MW), and energy production during the day, while ensuring their operation in a centralized system or in an isolated mode [1-2].

At present, the solar cells (SC) with several (3-6) active p-n junctions and a total spectral range of spectral response of 380–1850 nm are already available or in the final stages of development [3-6]. They absorb the solar spectrum in terms of its energy content almost completely, unlike the silicon SCs operating in the spectral range of 350–1100 nm, and other SCs with an even narrower range of spectral response. Although the efficiency of SCs only partly depends on the spectral response range, the multijunction SCs have the highest efficiency (40% and higher), the works are being carried out for its further increase. The modules based on such multi-junction SCs, shall be further called the full-spectrum modules (FSM) by using this attribute as a determinant one.

The problem of using the FSM-based solar power plants in the solar power engineering to implement the advantages of their high efficiency is of not only practical but also scientific interest, since the FSMs have signifi-



ходимо из-за миниатюрности таких СЭ и из-за того, что КПД преобразования при концентрировании излучения повышается. Отметим, что СЭС на основе других СЭ практически никогда не используют концентрирование солнечного излучения, но слежение за Солнцем, чаще одноосное, может иметь место для увеличения суточной электрогенерации.

Еще одна особенность таких СЭС состоит в том, что разработка ПСМ усложнена обширной вариативностью параметров конструкции по типу и размеру его компонент: концентратора, СЭ, следящей опоры. Как следствие этой вариативности формируется научная задача по созданию специального критерия оценки ПСМ, учитывающего и свойства конструкции, и возможность внедрения СЭС на их основе в распределенную энергетику.

ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ LCOE КАК КРИТЕРИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СЭС НА ОСНОВЕ ПСМ

В настоящее время основным критерием при разработке солнечных модулей традиционно выступает стандартизированный КПД для СЭ и для модуля (стандарт ASTM G 173-03). Нацеленность на данный критерий дает возможность проводить исследования, направленные на снижение оптических потерь при концентрировании излучения, на увеличение эффективности фотопреобразования. Если при этом дополнительным критерием выступает точность слежения за Солнцем, то при обеспечении ее приемлемого значения следящая опора с модулями наивысшего КПД воплотит собой завершение этапа прототипирования СЭС. На следующем этапе работы над проектом СЭС предполагается расчет КИУМ (коэффициент использования установленной мощности) в локации СЭС и расчет укрупненных экономических показателей в известных рыночных условиях для обоснования целесообразности проекта. Например, для сравнения энергетических технологий широко применяется показатель LCOE (средневзвешенная себестоимость электроэнергии, англ. – *Levelised Cost of Energy*).

Однако процесс усовершенствования модуля по критерию КПД может подразумевать выход на максимальное значение в ущерб экономическому фактору: рост стоимости компонент и технологических процессов может иметь преимущественный вклад в размер LCOE, не покрываемый увеличением энерговыработки.

Кроме того, при полноспектральном преобразовании в большей степени проявляется зависимость энерговыработки от спектрального состава

cant differences from silicon and other solar cell batteries. Moreover, the market entry of the FSM-based solar power plants shall be different, at least since its stall shall be “conquered” due to its competitive advantages.

The peculiarity of the FSM-based solar power systems is that they almost always include optical concentration of solar radiation and the Sun position tracking. The specificity is demonstrated both due to the concentration and tracking processes that occur simultaneously with the power generation, and due to the availability of the relevant structural elements (see the figure).

Tracking is necessary as a result of the direct solar radiation concentration on the surface of multijunction solar cells, and concentration is required due to the small size of such solar cells and due to the increased conversion efficiency in the case of radiation concentration. It should be noted that the solar power plants based on other solar cells almost never use the solar radiation concentration. However, the Sun tracking (often uniaxial process) can take place: to increase the daily power generation.

Another feature of such solar power plants is that the FSM development is complicated by the extensive variability of design parameters by the type and dimensions of its components: a concentrator, a solar cell, a tracking support. As a consequence of this variability, a scientific mission is determined to create a special FSM evaluation criterion with due regard to both the design properties and possible integration of the solar power plants based on them into the distributed power generation industry.

RELATIVE LCOE AS A CRITERION FOR DEVELOPING THE FSM-BASED SOLAR POWER PLANTS

At present, the main criterion in the development of solar modules is conventionally the standardized efficiency for the solar cell and for the module (ASTM G 173-03). Focusing on this criterion makes it possible to conduct research aimed at reducing the transmission losses during the radiation concentration process, and increasing the photovoltaic conversion efficiency. If the additional criterion is the Sun tracking accuracy, then, upon ensuring its acceptable value, a tracking support with the highest efficiency modules shall represent completion of the SPP prototyping stage. The next stage of the SPP project involves calculation of the *plant capacity factor* at the SPP location and calculation of the aggregated economic indicators in the well-known market conditions to justify the project feasibility. For example, the following indicator is widely used to compare the power engineering technologies: LCOE (*Levelised Cost of Energy*).

солнечного излучения в годовом периоде [9]. Это отразится на значении КИУМ, но не на номинальном КПД, так как последний как критерий оценки разработки включает в себя информацию только о том, как работает модуль при спектре AM1.5, согласно стандарту ASTM G 173-03.

Наконец, максимизация КПД СЭ и ПСМ в качестве основного критерия не решает проблему оптимальности конструкции по типу и размеру компонент, так как достижение максимального КПД станет результатом совершенствования технологии изготовления варианта конструкции, выбранного единожды на самом раннем этапе проектирования, что делает невозможным провести разработку с учетом текущей или прогнозируемой рыночной ситуации.

Указанные выше задачи, как мы полагаем, могут быть решены таким образом, что уже на начальном этапе разработки конструкции СЭС принимается во внимание ее будущая конкурентоспособность. Одним из основных критериев оптимизации может выступать LCOE (руб./кВт·ч). Значение LCOE в абсолютном выражении зависит от рыночных условий на этапе обоснования экономического проекта и от результатов их прогнозирования, а также, не в меньшей степени, от условий инсоляции места расположения СЭС. Временной лаг от начала разработки до обоснования экономического проекта и отсутствие сведений о том, где будет расположена СЭС, делают на начальном этапе невозможным определение LCOE в абсолютном выражении.

В связи с этим предлагается оценивать LCOE СЭС на основе ПСМ в отношении к LCOE одной из востребованных на рынке СЭС, решая тем самым проблему оценки конкурентоспособности в одинаковых и известных условиях, которые имеют сходный прогностический потенциал, проявляемый в сходных атмосферных условиях, влияющих на инсоляцию.

Показатель LCOE (руб./кВт·ч) учитывает затраты на производство электроэнергии, разнесенные на протяжении жизненного цикла СЭС, представляет собой среднюю расчетную стоимость производства единицы электроэнергии с учетом инвестиционных условий.

$$LCOE = \sum_{t=1}^n \frac{CAPEX_t + OPEX_t}{(1+r)^t} \bigg/ \sum_{t=1}^n \frac{E_1(1-d)^{t-1}}{(1+r)^t}, \quad (1)$$

где затраты в год t будут следующих типов: $CAPEX_t$ – удельные капитальные, руб./кВт; $OPEX_t$ – удельные операционные, руб./кВт; E_1 – удельная выработка электроэнергии в первый год работы электростан-

However, the module improvement process based on the efficiency criterion may imply reaching the maximum value to the detriment of economic factor: the increase in the cost of components and technological processes may have a predominant contribution to the LCOE value, not covered by the increased energy yield.

In addition, in the case of full-spectrum conversion, the dependence of energy yield on the spectral composition of solar radiation during the year is demonstrated to a greater extent [9]. It shall have impact on the *plant capacity factor value*, but not the nominal efficiency, since the latter as a development evaluation criterion includes information only about the module operation in a spectrum of AM1.5 according to ASTM G 173-03.

Finally, the efficiency maximization of solar cells and FSMs as the main criterion does not solve the optimal design issue in terms of the component type and dimensions, since the maximum efficiency shall result from improving the production technology of a design option selected once at the earliest design stage that makes it impossible to develop with due regard to the current or expected market conditions.

In our opinion, the above tasks can be solved by taking into account the future SPP competitiveness already at the initial stage of its design development. One of the main optimization criteria can be the LCOE (RUB/kWh). The LCOE value in absolute terms depends on the market conditions at the economic project justification stage and on the results of its forecasting, as well as, just as much, on the insolation conditions of the solar power plant location. The time lag from the start of development to the economic project justification and the lack of information about where the solar power plant will be located make it impossible to determine the LCOE value in absolute terms at the initial stage.

In this regard, it is proposed to evaluate the LCOE of the FSM-based SPPs in relation to the LCOE of one of the commercially successful SPPs, thereby solving the competitiveness evaluation issue in the same and well-known conditions that have similar predictive potential, manifested under the similar atmospheric conditions affecting the insolation process.

The LCOE indicator (RUB/kWh) shall consider the costs of power production, distributed throughout the life cycle of the solar power plant, and represent the average estimated manufacturing costs of a unit of electric energy with due regard to the investment conditions.

$$LCOE = \sum_{t=1}^n \frac{CAPEX_t + OPEX_t}{(1+r)^t} \bigg/ \sum_{t=1}^n \frac{E_1(1-d)^{t-1}}{(1+r)^t}, \quad (1)$$

where the costs during the year t shall be of the following types: $CAPEX_t$ – specific capital outlays,

ции кВт·ч/кВт; r – ставка дисконтирования, % в год; n – количество лет эксплуатации; d – коэффициент деградации электростанции, % в год [10]. Капитальные затраты – единовременные: $CAPEX_1 = CAPEX$, $CAPEX_2 = CAPEX_3 = \dots = CAPEX_t = 0$, операционные затраты за каждый год допустимо принять одинаковыми: для $t=1..n$ $OPEX_t = OPEX$. Тогда формула (1) принимает вид:

$$LCOE = \frac{\frac{1}{1+r}}{\sum_{t=1}^n \frac{(1-d)^{t-1}}{(1+r)^t}} \cdot \frac{CAPEX}{E_1} + \frac{\sum_{t=1}^n \frac{1}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{(1-d)^{t-1}}{(1+r)^t}} \cdot \frac{OPEX}{E_1} = R_{CAPEX} + R_{OPEX}, \quad (2)$$

где R_{CAPEX} – капитальная составляющая себестоимости электроэнергии, а R_{OPEX} – условно-постоянная составляющая себестоимости.

Условие конкурентоспособности любой новой конструкции СЭС и референтной:

$$LCOE \leq LCOE^{ref} \text{ или } R_{CAPEX} \leq R_{CAPEX}^{ref} - (R_{OPEX} - R_{OPEX}^{ref}). \quad (3)$$

То есть капитальная составляющая себестоимости электроэнергии разрабатываемой СЭС должна быть не больше аналогичного параметра у референтной СЭС за вычетом разности условно-постоянных составляющих себестоимости новой и референтной технологий. Операционные расходы (OPEX) на СЭС со слежением определено выше и ожидается, что R_{OPEX} будет больше R_{OPEX}^{ref} , однако может быть и наоборот, если энерговыработка первого года эксплуатации новой технологии E_1 будет в достаточной степени превышать аналогичный параметр референтной технологии. В последнем случае условие конкурентоспособности (3) новой технологии смягчится.

Характер технологий СЭС таков, что операционные расходы много ниже капитальных, поэтому, не ограничивая общности, можно в качестве условия конкурентоспособности использовать отношение капитальных составляющих себестоимости электроэнергии новой и референтной технологий (4).

$$R_{CAPEX} \leq R_{CAPEX}^{ref} \quad (4)$$

Условие конкурентоспособности новой технологии при равных финансовых условиях (r), коэффици-

RUB/kW; $OPEX_t$ – specific operating costs, RUB/kW; E_1 – specific power generation during the first year of power plant operation, kWh/kW; r – discount rate, % per year; n – number of operating years; d – power plant degradation factor, % per year [10]. The capital costs shall be one-time: $CAPEX_1 = CAPEX$, $CAPEX_2 = CAPEX_3 = \dots = CAPEX_t = 0$, the operating costs for each year can be taken to be the same: for $t=1..n$ $OPEX_t = OPEX$. Then formula (1) shall be as follows:

$$LCOE = \frac{\frac{1}{1+r}}{\sum_{t=1}^n \frac{(1-d)^{t-1}}{(1+r)^t}} \cdot \frac{CAPEX}{E_1} + \frac{\sum_{t=1}^n \frac{1}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{(1-d)^{t-1}}{(1+r)^t}} \cdot \frac{OPEX}{E_1} = R_{CAPEX} + R_{OPEX}, \quad (2)$$

where R_{CAPEX} is the capital component of the power cost, and R_{OPEX} is the semi-constant component of the cost.

The competitiveness condition of any new and reference solar power plant design shall be as follows:

$$LCOE \leq LCOE^{ref} \text{ или } R_{CAPEX} \leq R_{CAPEX}^{ref} - (R_{OPEX} - R_{OPEX}^{ref}). \quad (3)$$

That is, the capital component of the power cost of the developed SPP shall not be greater than the similar parameter of the reference SPP minus the difference between the semi-constant cost components of the new and reference technologies. The operating expenses (OPEX) for the SPP with the tracking function are definitely higher. It is expected that R_{OPEX} shall be greater than R_{OPEX}^{ref} , but it may also be the other way around if the power production during the first operating year of the new technology E_1 shall significantly exceed the similar parameter of the reference technology. In the latter case, the competitiveness condition (3) of the new technology shall be softened.

The feature of SPP technologies is such that the operating costs are much lower than the capital costs. Therefore, without restricting the generality, the ratio of the capital power cost components of new and reference technologies (4) can be used as a competitiveness condition.

$$R_{CAPEX} \leq R_{CAPEX}^{ref} \quad (4)$$

The competitiveness condition of new technology under the equal financial conditions (r), degradation

циентах деградации (d), расчетных сроков эксплуатации (n):

$$CAPEX \leq CAPEX^{ref} \cdot E_1 / E_1^{ref} \quad (5)$$

Для конкурентоспособности удельные капитальные затраты на СЭС новой технологии не должны превышать удельные капитальные затраты на референтную СЭС, умноженные на коэффициент $C_E = E_1 / E_1^{ref}$, отражающий прирост ($C_E > 1$) или недостаток ($C_E < 1$) годовой энергосыработки по новой технологии.

Удельная (на единицу установленной мощности) годовая энергосыработка E_1 связана с показателем КИУМ: $E_1 = \text{КИУМ} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 1 \text{ кВт}$.

Установленная мощность определяется для плотности потока солнечного излучения 1 кВт/м^2 . Так как рассматривается единица установленной мощности, то влияние разницы в КПД СЭ и в других технических параметрах сравниваемых СЭС проявляется в разнице общей площади апертур модулей, которая требуется для генерирования 1 кВт при поглощении излучения с плотностью мощности 1 кВт/м^2 . Для предварительной оценки можно допустить, что реальная электрогенерация изменяется при естественном изменении плотности мощности поступающего излучения линейно с коэффициентом пропорциональности единица. Тогда коэффициент C_E равен отношению фактически поступающей за год солнечной энергии, P и P_{ref} , $\text{кВт} \cdot \text{час/м}^2$ в расчете на единицу установленной мощности сравниваемых СЭС.

$$C_E = E_1 / E_1^{ref} = \text{КИУМ} / \text{КИУМ}^{ref} = P / P^{ref}, \quad (6)$$

Для большей точности при определении C_E рекомендуется оценивать удельные выработки электроэнергии в первый год работы электростанций E_1 и E_1^{ref} .

Формулы (3–6) пригодны для оценки затрат на смену локации для известной СЭС. Или для определения целесообразности установки на следящие системы известных солнечных модулей, обычно установленных статично. В этом случае P – это энергия падающего солнечного излучения на СЭС с устройством слежения, попадающего на перпендикулярную лучам площадку, а P^{ref} – энергия солнечного излучения, попадающего на статично закрепленную поверхность.

Чтобы выразить капитальные затраты (CAPEX) на 1 м^2 апертуры СЭС, исходим из того, что CAPEX в расчете на 1 кВт установленной мощности больше CAPEX в расчете на 1 м^2 апертур во столько же раз,

factors (d) of the estimated service life (n) shall be as follows:

$$CAPEX \leq CAPEX^{ref} \cdot E_1 / E_1^{ref} \quad (5)$$

To be competitive, the specific capital costs of a technologically new solar power plant shall not exceed the specific capital costs of a reference solar power plant multiplied by the coefficient $C_E = E_1 / E_1^{ref}$ that indicates the increase ($C_E > 1$) or shortfall ($C_E < 1$) of annual power production using the new technology.

The specific (per unit of installed capacity) annual power production E_1 is related to the *plant capacity factor*: $E_1 = \text{plant capacity factor} \cdot 365 \cdot 24 \text{ h} \cdot 1 \text{ kW}$.

The installed capacity is determined for a solar radiation flux density of 1 kW/m^2 . Since a unit of installed capacity is considered, the effect of efficiency difference of the solar power plant and other technical parameters of the compared solar power plants is demonstrated by the difference in the total area of module apertures that is required to generate 1 kW when absorbing radiation with a power density of 1 kW/m^2 . For a preliminary evaluation, it can be assumed that the actual power generation is changed with a natural change in the power density of incoming radiation linearly with a proportionality coefficient of one. Then the coefficient C_E is equal to the ratio of the solar energy actually received per year, P and P_{ref} , kWh/m^2 per unit of installed capacity of the compared solar power plants.

$$C_E = E_1 / E_1^{ref} = \text{plant capacity factor} / \text{plant capacity factor}^{ref} = P / P^{ref}, \quad (6)$$

For greater accuracy in determining C_E , it is recommended to estimate the specific power generation during the first operating year of power plants E_1 and E_1^{ref} .

The formulas (3–6) are suitable for estimating the costs of changing the location of a well-known solar power plant or for determining the feasibility of installing the well-known solar modules (usually of static type) on the tracking systems. In this case, P is the energy of incident solar radiation on a solar power plant with a tracking device, falling on a site perpendicular to the rays, and P^{ref} is the energy of solar radiation falling on a statically fixed surface.

To express the capital expenses (CAPEX) per 1 м^2 of SPP aperture, it shall be assumed that CAPEX per 1 kW of installed capacity is greater than CAPEX per 1 м^2 of apertures by the same number of times as the area of apertures in м^2 that is required to generate 1 kW of installed capacity.



сколько площади апертур в м^2 необходимо для выработки 1 кВт установленной мощности.

$$\text{CAPEX}/\text{CAPEX}_m^2 = 1 \text{ kW (уст. мощн.)} / (1 \text{ kW}/\text{м}^2 (\text{солнечн. изл.}) \times \eta), \quad (7)$$

где CAPEX_m^2 – капитальные затраты на единицу площади апертур фотоэлектрических модулей, η – КПД фотоэлектрического модуля. Тогда, исходя из формул (5) и (6),

$$\text{CAPEX}_m^2 \leq \text{CAPEX}_{m^2}^{\text{ref}} \cdot P / P^{\text{ref}} \cdot \eta / \eta^{\text{ref}}. \quad (8)$$

Основное внимание при проектировании СЭС на основе ПСМ предлагается обратить на ее надежность, как способность сохранять требуемые свойства и выполнять предназначенные функции в течение заданного срока. В случае СЭС этот срок составляет порядка 25 лет. Таким образом, внимание разработчиков должно быть направлено на обеспечение безотказности, ремонтпригодности и долговечности установки, неопределяемых, к сожалению, в текущем моменте времени из-за отсутствия статистических данных о параметрах надежности.

Остальные характеристики СЭС, а именно, годовая энерговыработка и капитальные затраты, включающие стоимость компонент и технологий (на текущий момент разработки), предлагается рассматривать в качестве базисных и зависимых переменных при расчете и минимизации LCOE. Рассчитанное LCOE как критерий конкурентоспособности конструкции СЭС на основе ПСМ должен удовлетворять неравенствам (1-8). Сравнение может производиться с СЭС, которые вышли из стадии разработки и у которых известны точные LCOE и CAPEX, а также с СЭС, находящейся на стадии разработки, тогда эти параметры будут иметь оценочный характер. Оценочный характер также частично будет иметь CAPEX разрабатываемой СЭС на основе ПСМ, с точки зрения его будущего снижения за счет эффекта масштаба при укрупнении производства.

Пример оценки по формуле (8) показан для локации в Забайкальском крае (51 с. ш., 108 в. д.), где усредненная за несколько лет плотность прямого солнечного излучения – 1636 кВт·час/ м^2 /год, а усредненная плотность солнечного излучения, падающая на статичную, наклоненную на оптимальный угол площадку, – 1717 кВт·час/ м^2 /год [11]. В работе [12] представлен ПСМ с $\eta=36\%$, который ниже, чем КПД используемого в этом модуле СЭ (42,7%), из-за

$$\begin{aligned} \text{CAPEX}/\text{CAPEX}_m^2 &= \\ &= 1 \text{ kW (installed capacity)} / \\ &/ (1 \text{ kW}/\text{м}^2 (\text{solar radiation}) \times \eta), \end{aligned} \quad (7)$$

where CAPEX_m^2 – capital costs per unit area of the apertures of photovoltaic modules, η – efficiency of the photovoltaic module. Then, based on the formulas (5) and (6),

$$\text{CAPEX}_m^2 \leq \text{CAPEX}_{m^2}^{\text{ref}} \cdot P / P^{\text{ref}} \cdot \eta / \eta^{\text{ref}}. \quad (8)$$

When designing the FSM-based solar power plant, it is proposed to focus mainly on its reliability as the ability to maintain the required properties and perform the intended functions during the specific period of time. In the case of a solar power plant, this period is approximately 25 years. Thus, the attention of developers shall be directed to ensuring the installation failure-free operation, maintainability and durability that, unfortunately, cannot be currently determined due to the lack of statistical data confirming the reliability parameters.

The remaining specifications of the solar power plant, namely, annual energy yield and capital costs, including the cost of components and technologies (at the current stage of development), are proposed to be considered as the basic and dependent variables when calculating and minimizing LCOE. The calculated LCOE as a competitiveness criterion of the design of a FSM-based solar power plant shall comply with the inequalities (1-8). The comparison can be made with the solar power plants that have left the development stage and obtained the well-known exact LCOE and CAPEX values, as well as with the solar power plants that are at the development stage, then these parameters shall be of an evaluative nature. The CAPEX value of the FSM-based SPP being developed shall also partially have an evaluative nature in view of its future reduction due to the scale effect during the production concentration.

An example of evaluation using the formula (8) is shown for a location in the Zabaikalskiy region (51N, 108E), where the average direct solar radiation density over several years is 1636 kWh/ м^2 /year, and the average solar radiation density falling on a static area inclined at an optimal angle is 1717 kWh/ м^2 /year [11]. The paper [12] presents a FSM with $\eta = 36\%$ that is lower than the efficiency of solar cell used in this module (42.7%) due to the transmission losses during the solar radiation concentration process. A widely used silicon module with an efficiency of $\eta^{\text{ref}}=18\%$ [1] was used for a comparison. Then, as for the competitiveness in terms of cost factor, it is possible that the capital costs per 1 м^2 of the



оптических потерь при концентрировании солнечного излучения. В качестве сравнения использован широко распространенный кремниевый модуль с КПД $\eta^{\text{ref}}=18\%$ [1]. Тогда для конкурентоспособности по фактору себестоимости допустимо, чтобы капитальные затраты в расчете на 1 м^2 апертуры ПСМ были выше капитальных затрат на сравниваемый кремниевый модуль не более, чем в 1,9 раз.

Для более точной оценки относительного LCOE СЭС на основе ПСМ требуется учесть спектральный состав годового солнечного излучения, так как в регионах с высоким показателем мутности атмосферы КПД ПСМ снижается [9]. Также необходимо учесть температурное изменение КПД СЭ, в большей степени характерное для кремниевых модулей. Снижению LCOE способствует оптимизация конструкции СЭС по типам и размерам пары концентратор – СЭ и размещение СЭС в локации с высоким уровнем прямого солнечного излучения. Отметим, что в мире есть территории, где в отличие от рассмотренной локации в Забайкальском крае годовое прямое излучение выше годового излучения, падающего оптимально наклоненную статичную площадку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для упрощения выхода на рынок СЭС на основе ПСМ с высоким КПД было предложено уже на стадии разработки проводить оценку средневзвешенной себестоимости, с которой будет генерироваться электроэнергия на СЭС, и использовать ее отношение к средневзвешенной себестоимости конкурентных технологий СЭС как критерий при проведении НИОКР. Использование относительного LCOE в качестве критерия оценки СЭС на основе ПСМ на этапе проектирования конструкции обеспечит рациональный подход к достижению цели по разработке и внедрению ПСМ.

REFERENCES

1. Popel' O. S., Tarasenko A. B. Modern Development Trends in Photovoltaics (Review). *Thermal Engineering*. 2021;11(5): 5–25. DOI: 10.1134/S0040363621100039.
Попель О. С., Тарасенко А. Б. Современные тенденции развития фотоэлектрической энергетики (обзор). *Теплоэнергетика*. 2021;11(5): 5–25. DOI: 10.1134/S0040363621100039.
2. Lyubimova N. G. The definition of "distributed energy". *Vestnik universiteta*. 2014; 5: 103–105. eLIBRARY ID: 21596142. ISSN 2686-8415.
Любимова Н. Г. Определение понятия «Распределенная энергетика». *Вестник университета*. 2014; 5: 103–105. eLIBRARY ID: 21596142. ISSN 2686-8415.
3. <http://www.azurspace.com/index.php/en/products/products-cpv/cpv-solar-cells>.
4. Green M. A., Dunlop E. D., Siefert G. et al. Solar cell efficiency tables (version 57). *Progress in Photovoltaics Research and Applications*. 2023;31:3–16. DOI:10.1002/pip.3646.

FSM aperture are higher than the capital costs of the compared silicon module by no more than 1.9 times.

For a more accurate assessment of the relative LCOE of the FSM-based SPP, it is necessary to consider the spectral composition of the annual solar radiation, since in the regions with a high atmospheric turbidity index, the FSM efficiency is decreased [9]. Moreover, it is necessary to take into account the temperature changes in the SPP efficiency that is more typical for the silicon modules. The reduction of LCOE value is facilitated by optimizing the SPP design by the types and dimensions of the concentrator-SPP pair and placing the SPP in a location with a high level of direct solar radiation. It should be noted that there are some territories in the world where the annual direct radiation is higher than the annual radiation falling on an optimally inclined static site, unlike the location considered in the Zabaikalskiy region.

CONCLUSION

In order to simplify the market entry of the highly-efficient FSM-based solar power plants, it is proposed to conduct an evaluation of the average weighted cost at which the power shall be generated at the solar power plant already at the development stage and to use its ratio to the average weighted cost of the competitive solar power plant technologies as a criterion when conducting R&D. Application of the relative LCOE as the evaluation criterion for the FSM-based SPPs at the design stage shall ensure a sustainable approach to achieving the goal of the FSM development and implementation.

AUTHORS

Ionova Evgeniya Aleksandrovna, research associate at the Ioffe Physical-Technical Institute, Laboratory of Photovoltaic Converters, e-mail: ionova@mail.ioffe.ru; Saint Petersburg, Russia. Region of interest: concentrator photovoltaics.
ORCID: 0000-0003-2886-6706

Ovchinnikov Kirill Andreevich, Master's student, St. Petersburg Polytechnic University, e-mail: owe4kink@yandex.ru; Saint Petersburg, Russia. Region of interest: innovation economics in power engineering.
ORCID 0009-0006-5774-0925

Malevskiy Dmitry Andreevich, research assistant, Ioffe Physical-Technical Institute, Photovoltaics Laboratory, e-mail: dmalevsky@scell.ioffe.ru; Saint Petersburg, Russia. Region of interest: concentrator power plants.
ORCID: 0000-0002-9337-4137

AUTHOR CONTRIBUTION

Ionova E. A.: concept of the article based on the methods of solving three issues: implementation of a new development in the power engineering sector, evaluation of its energy parameters, assessment of the economic project; Ovchinnikov K. A.: assessment of the economic specifications of an innovative project in the power engineering sector; Malevskiy D. A.: development of a solar energy system with the full-spectrum solar cells.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

5. Schroth P., Löckenhoff R., Fuhrmann D. et al. AZUR's new 5C46 CPV cell: Final design for optimized outdoor performance. *AIP Conference Proceedings*. 2022; 2550:020008. DOI:10.1063/5.0100397.
6. Geisz J. F., France R. M., Schulte K. L., Steiner M. A., Norman A. G., Guthrey H. L., Young M. R., Song T., Moriarty T. Six-junction III-V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration. *Nature Energy*. 2020;5:326–335. DOI:10.1038/s41560-020-0598-5.
7. Andreev V. M., Davidyuk N. Y., Malevsky D. A., Pan'chak A. N., Rumyantsev V. D., Sadchikov N. A., Chekalin A. V., Luque A. New-Generation Concentrator Modules Based on Cascade Solar Cells: Design and Optical and Thermal Properties. *Tech. Phys.* 2014;59(11):1650–1657. DOI: 10.1134/S1063784214110024.
Андреев В. М., Давидюк Н. Ю., Малевский Д. А., Паньчак А. Н., Румянцев В. Д., Садчиков Н. А., Чекалин А. В. Концентраторные модули нового поколения на основе каскадных солнечных элементов: конструкция, оптические и температурные свойства, ЖТФ. 2014;84(11):72–79.
8. RU Patent 2476957. *Solar photo energy apparatus/ Andreev V. M., Rumyantsev V. D., Pokrovsky P. V., Malevsky D. A., Kognovitsky S. O., Gushchina A. A.* RU Патент № 2476957. Солнечная фотозергоустановка / Андреев В. М., Румянцев В. Д., Покровский П. В., Малевский Д. А., Когновицкий С. О., Гущина А. А.
9. Ionova E. Power generation of multi-junction solar cells, taking into account the latitudinal variability of the spectral composition of radiation. *Photonics Russia*. 2023;17(7): 516–524. DOI:10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.7.516.524.
Ионова Е. А. Энерговыработка многопереходных солнечных элементов с учетом широтной изменчивости спектрального состава излучения. *Фотоника*. 2023;17(7): 516–524. DOI:10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.7.516.524.
10. Barinova V. A., Demidova K. V. Economic Feasibility of Solar Energy in Russia. *Russian Economic Development*. 2023; 30(10):18–31.
Баринаова В. А., Демидова К. В. Экономическая целесообразность развития солнечной энергетики в России. *Экономическое развитие России*. 2023; 30(10):18–31.
11. Photovoltaic geographical information system. URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#api_5.3.
12. Steiner M., Bösch A., Dilger A., Dimroth F., et al., Steiner M. et al. FLATCON® CPV module with 36.7% efficiency equipped with four junction solar cells. *Progress in Photovoltaics Research and Applications*. 2015; 23(10): 1323–1329. DOI: 10.1002/pip.2568.

АВТОРЫ

- Ионова Евгения Александровна, науч. сотр. ФТИ им. А. Ф. Иоффе, лаб. фотозлектрических преобразователей, e-mail: ionova@mail.ioffe.ru; Санкт-Петербург, Россия. Область интересов: концентраторная фотовольтаика
ORCID: 0000-0003-2886-6706
- Овчинников Кирилл Андреевич, магистрант, СПбПУ, e-mail: owe4kink@yandex.ru; Санкт-Петербург, Россия. Область интересов: экономика инноваций в энергетике.
ORCID 0009-0006-5774-0925
- Малевский Дмитрий Андреевич, науч. сотр. ФТИ им. А. Ф. Иоффе, лаб. фотовольтаики, e-mail: dmalevsky@scell.ioffe.ru; Санкт-Петербург, Россия. Область интересов: концентраторные энергоустановки.
ORCID: 0000-0002-9337-4137

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Ионова Е. А.: концепция статьи, построенная на путях решения трех проблем: внедрение новой разработки в сфере энергетики, оценка ее энергетических параметров, оценка экономического проекта; Овчинников К. А.: оценка экономических характеристик инновационного проекта в сфере энергетики; Малевский Д. А.: разработка солнечной энергетической системы с полносспектральными солнечными элементами.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сминаемые конструкции – отличные устройства для поглощения энергии



3D-печать уже более двух десятилетий используется для создания изделий космического машиностроения в Лаборатории реактивного движения NASA [NASA Jet Propulsion Lab (JPL)], но в последние годы ее роль значительно возросла. Хотя первое известное использование 3D-печати в проектах Лаборатории реактивного движения относится к 1999 году, но только в 2009 году начались значительные вливания финансовых средств в эту технологию.

Новое применение АТ-методов отражено в создании решетчатых конструкций. Такие изделия – отличное решение для поглощения энергии при жестких ударах. Сминаемые поглотители энергии обладают идеальными характеристиками поглощения энергии благодаря своей разреженной и периодической структуре. Они также широко используются в космосе для смягчения ударов во время развертывания космических аппаратов, посадки на планеты и отделения ракеты-носителя. 3D-печать дробимых материалов особенно интересна тем, что она значительно расширяет возможности инженерного проектирования. При использовании традиционных методов производства конструкция дробимых решеток ограничивалась пенопластами и сотами. С помощью 3D-печати специалисты планируют печатать более широкий спектр решеток с различной геометрией, что позволяет дополнительно оптимизировать свойства по поглощению энергии.

Но есть препятствия, которые предстоит преодолеть технологам при 3D-печати, – общий технологический процесс. Хотя сам процесс 3D-печати относительно быстрый, требования к постобработке значительно увеличивают время выполнения заказа. В Лаборатории реактивного движения для напечатанных металлических деталей часто требуется горячее изостатическое прессование (HIP) для повышения усталостной прочности, резка проволокой для снятия их с платформы, термическая обработка для упрочнения материалов, финишная обработка поверхности для улучшения усталостных характеристик и окончательная обработка для получения точных размеров. Каждый из этих этапов увеличивает время и стоимость. Без усовершенствований, которые сократят время постобработки при сохранении характеристик материала, широкое распространение аддитивных технологий будет по-прежнему сдерживаться эффективностью производства и доступностью. Преодоление этих барьеров станет ключом к раскрытию всего потенциала 3D-печати для будущих космических миссий.

<https://www.tctmagazine.com/>