

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-30-41>

УКД 621.311.243

Оценка эффективности работы солнечной электростанции на крыше здания в Ханое

Т. Н. Нгуен¹⁾, В. Д. Сизов²⁾, М. Ф. Ву¹⁾, Т. Т. Х. Ку¹⁾

¹⁾Научный институт энергетики, Вьетнамская академия наук и технологий (Ханой, Вьетнам),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Вьетнам – страна с огромным солнечным потенциалом, в которой могут быстро развиваться солнечные технологии. Инвесторы заинтересованы в строительстве солнечных электростанций на крышах, установка которых поможет владельцам снизить ежемесячные расходы на электроэнергию и даже получить экономическую выгоду, продавая избыточную электроэнергию, поступающую от них в электрическую сеть. В исследовании представлены результаты моделирования с использованием программы PVsyst солнечной электростанции мощностью 26 кВтп на крыше коммерческого здания в Ханое, что дает возможность оценить ее работоспособность в условиях солнечной радиации в северо-восточном регионе Вьетнама. Результаты позволили рассчитать потенциал солнечной энергии, количество вырабатываемой электроэнергии и эффективность солнечной электростанции, подключенной к сети. Солнечная энергия используется во Вьетнаме с 1990-х гг., но в основном в районах, удаленных от государственной электросети, таких как горные местности, острова. Также с 2010 г. солнечная энергия используется в отдельных жилых кварталах для удовлетворения потребности в электроэнергии мелких и средних потребителей. Общая мощность произведенной солнечными электростанциями электрической энергии во Вьетнаме к 2017 г. составила около 8 МВт, что очень незначительно. Это связано с отсутствием политики поддержки развития солнечной энергетики со стороны правительства. В соответствии с текущим графиком повышения цен на электроэнергию во Вьетнаме инвестиции в строительство на крышах зданий солнечных электростанций, подключенных к сети, могут быть экономически целесообразными, внося при этом положительный вклад в защиту окружающей среды и борьбу с изменением климата за счет сокращения выбросов CO₂.

Ключевые слова: солнечные батареи, инвертор, соединение солнечной электростанции с электрической сетью, потери

Для цитирования: Оценка эффективности работы солнечной электростанции на крыше здания в Ханое / Т. Н. Нгуен [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 1. С. 30–41. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-30-41>

Адрес для переписки

Нгуен Тху Нга
Научный институт энергетики,
Вьетнамская академия наук и технологий
ул. Хоанг Куок Вьет, 18,
г. Ханой, Вьетнам
Тел.: +84 903 22-44-48
nguyenthuynga@ies.vast.vn

Address for correspondence

Nguyen Thuy Nga
Institute of Energy Science,
Vietnam Academy of Science and Technology
18 Hoang Quoc Viet str.,
Hanoi, Vietnam
Tel.: +84 903 22-44-48
nguyenthuynga@ies.vast.vn

Evaluation of Work Efficiency of the Solar Power Plant Installed on the Roof of a House in Hanoi City

T. N. Nguyen¹⁾, V. D. Sizov²⁾, M. P. Vu¹⁾, T. T. H. Cu¹⁾

¹⁾Institute of Energy Science, Vietnam Academy of Science and Technology (Hanoi, Vietnam),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Vietnam is a country of a great solar potential; solar technology is growing rapidly in Vietnam and investors are very interested in building solar power plants. Construction of the rooftop solar power stations can help owners reduce monthly electricity costs and even get economic benefits by selling excess electricity coming from a solar power plant (PV) to the utility grid. In this study, the design results of a rooftop grid-tied solar power station with the capacity of 26 kWp for a commercial building were introduced to have a basis to assess the operation ability of solar power station under solar radiation conditions in Hanoi city, Vietnam. The simulation results using the PVsyst program have made it possible to calculate the solar energy potential in Hanoi city, the power generation and efficiency of the grid-tied solar power station. Solar power has been applied in Vietnam since the 1990s but is mainly used for areas that were far from national power grid such as mountainous areas, islands. Small scale grid-tied solar power has been developed since 2010 and mainly is used for residential applications or small and medium scale consumers. The total capacity of electricity produced by solar power plants in Vietnam by 2017 was only about 8 MW; this value is very low as compared to the potential of solar power in Vietnam. This is due to the absence of the government support for the policy of developing solar power. In accordance with the current roadmap of raising electricity prices in Vietnam, construction investment of rooftop solar power stations is economically feasible while contributing to environmental protection and counteracting climate change phenomenon by reducing the amount of CO₂ emitted into the environment.

Keywords: solar panels, inverter, connection of solar power station to the grid, losses

For citation: Nguyen T. N., Sizov V. D., Vu M. P., Cu T. T. H. (2020) Evaluation of Work Efficiency of the Solar Power Plant Installed on the Roof of a House in Hanoi City. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (1), 30–41. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-30-41> (in Russian)

Введение

В настоящее время в мире быстро развивается технология использования солнечной энергии: в 2017 г. общее количество электроэнергии, произведенной солнечными энергетическими установками, подключенными к электрическим сетям, возросло до 99,1 ГВт [1, 2]. Китай, США, Япония и Германия – страны, вырабатывающие наибольшее количество электроэнергии на солнечных электростанциях (рис. 1).

Солнечная энергия используется во Вьетнаме с 1990-х гг., но в основном в районах, удаленных от государственной электросети, таких как горные местности, острова. Также с 2010 г. развивается использование солнечной энергии в отдельных жилых кварталах для удовлетворения потребности в электроэнергии мелких и средних потребителей. Общая мощность произведенной солнечными электростанциями электрической энергии во Вьетнаме к 2017 г. составила около 8 МВт [3], что очень незначительно. Это связано с отсутствием до недавнего времени политики поддержки развития солнечной энергетики со стороны правительства.

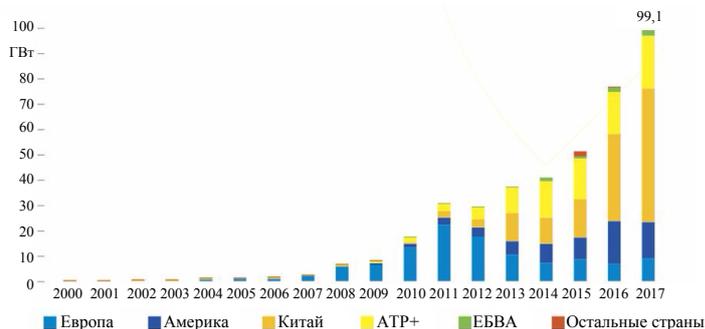


Рис. 1. Суммарная мощность электроэнергии, вырабатываемой солнечными электростанциями в мире [1]

Fig. 1. The total power generated by solar power plants in the world [1]

В апреле 2017 г. правительство Вьетнама объявило о политике поддержки развития солнечной энергетики в целом и солнечных электростанций, устанавливаемых на крышах, в частности [4]. Избыточная электроэнергия, произведенная солнечной электростанцией, может быть продана национальной сети по цене 9,35 цента США за 1 кВт·ч. Поэтому инвесторы заинтересованы в создании солнечных электростанций на крышах домов во Вьетнаме.

Вьетнам – страна с большим потенциалом солнечной энергии [5–9], со средней солнечной радиацией от 4 до 5 кВт·ч/м² в день и средним количеством солнечного света от 1600 до 2700 ч в год. По оценкам экспертов, центральный и южный регионы Вьетнама имеют наибольший потенциал для реализации проектов солнечных электростанций, а северо-восточный регион обладает низким потенциалом солнечной радиации.

В статье анализируется техническая эффективность солнечной электростанции мощностью 26 кВтп, установленной на крыше коммерческого здания в г. Ханое, с целью оценки возможностей ее эксплуатации в условиях солнечной радиации в северо-восточном регионе Вьетнама. В ходе исследования была использована программа PVSyst (Photovoltaic system simulation program) для определения потенциала солнечной энергии в Ханое, возможностей выработки электроэнергии и эффективности солнечной электростанции, подключенной к электросети.

Технология работы солнечной электростанции на крыше здания

При благоприятных погодных условиях солнечные панели поглощают солнечную энергию и вырабатывают электрическую. Постоянный ток, получаемый от солнечных батарей, через инвертор преобразуется в переменный с необходимыми напряжением и частотой для подключения к промышленной электрической сети (через счетчик для учета мощности, отданной в сеть). Пользователи получают электроэнергию из сети через второй счетчик, установленный для учета ее домашнего использования. Каждый месяц местная электроэнергетическая компания сверяет показания

счетчиков, сравнивая количество использованной электроэнергии с количеством переданной в сеть. Если количество электроэнергии, переданной в сеть, превышает количество использованной, домовладелец получает оплату от электрокомпаний.

В то время как солнечные батареи вырабатывают электроэнергию, общая электрическая сеть страны играет роль накопителя электроэнергии и при необходимости возвращает ее потребителям. Два счетчика можно заменить на один комбинированный, имеющий двустороннее вращение диска, который измеряет разность количества отданной в сеть электроэнергии и использованной потребителем.

Основные компоненты подключенной к сети солнечной энергосистемы (рис. 2):

- панели солнечных батарей, в том числе модули панелей солнечных батарей. В зависимости от требований, предъявляемых к мощности, напряжению и силе тока, соединение панелей солнечных батарей может быть последовательным, параллельным или комбинированным. Каждый день, когда солнечная батарея получает энергию солнца, она генерирует постоянный ток в системе. Выходная мощность солнечных батарей прямо пропорциональна интенсивности солнечного излучения;
- выключатель постоянного тока (используется для отключения подачи постоянного тока от солнечных батарей при проверке и ремонте);
- высокоэффективный инвертор (преобразует постоянный ток в переменный стандартного синусоидального вида со стабильной частотой);
- выключатель переменного тока (используется для отключения от промышленной электрической сети солнечной батареи для ее проверки и ремонта);
- двусторонние счетчики (используются для измерения количества электроэнергии, передаваемой в сеть и получаемой из нее).



Рис. 2. Принципиальная схема солнечной фотоэлектрической системы на крыше здания во Вьетнаме

Fig. 2. Schematic diagram of the solar PV system on the rooftop in Vietnam

Рассмотрим преимущества такой системы.

- Ежемесячное снижение оплаты за используемую электроэнергию – главное из них. Поскольку система не требует ежемесячных расходов и является малообслуживаемой, получение электроэнергии всегда стабильно и экономично. Солнечные энергетические системы большой мощности также могут приносить дополнительный доход домохозяйствам или компаниям от продажи электроэнергии местным энергетическим компаниям.

- Солнечные энергетические установки являются экологически чистым источником энергии. Использование солнечной энергии позволяет снизить зависимость от ископаемых источников энергии (нефть, уголь и др.).

- Во Вьетнаме правительство проводит политику поддержки и поощрения использования домашними хозяйствами и административными учреждениями систем преобразования солнечной энергии в электрическую, подключенных к государственной сети.

Способ подключения. Все солнечные панели соединяются последовательно для повышения напряжения в соответствии с диапазоном рабочих напряжений инвертора, подключенного к сети. После устойчивого соединения с солнечной панелью инвертор подключается к трехфазной электрической сети внутри здания.

Мониторинг системы. Солнечная электростанция, подключенная к сети с использованием инвертора, обладает способностью работать стабильно, точно, долго и имеет функцию беспроводного дистанционного мониторинга. Таким образом, все технические характеристики станции могут удаленно контролироваться портативными электронными устройствами, что позволяет клиентам точно, гибко и удобно управлять работой всей солнечной электростанции.

Проект солнечной электростанции, подключенной к сети

В данном исследовании проект солнечной электростанции мощностью 26 кВтп, установленной на крыше коммерческого здания в Ханое и подключенной к сети, проанализирован с помощью специализированного программного обеспечения PVsyst [10–12].

Ханой является регионом Вьетнама с относительно средним солнечным потенциалом при среднегодовой солнечной радиации около 3,85 кВт·ч/м² в сутки (рис. 3). В периоды с января по март и с октября по декабрь среднесуточные значения солнечной радиации самые низкие – от 2,49 до 3,66 кВт·ч/м², а с апреля по сентябрь включительно достигают наивысших значений – от 3,79 до 4,67 кВт·ч/м² (табл. 1, рис. 4).

Таблица 1

Среднесуточная солнечная радиация по месяцам и за год в Ханое
Daily total average solar radiation by month and per year in Hanoi

Показатель	Значение по месяцам												Среднее за год
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й	11-й	12-й	
Среднесуточная солнечная радиация, кВт·ч/м ²	2,49	2,86	3,66	4,07	4,59	4,67	4,6	4,56	4,39	3,79	3,39	3,02	3,85

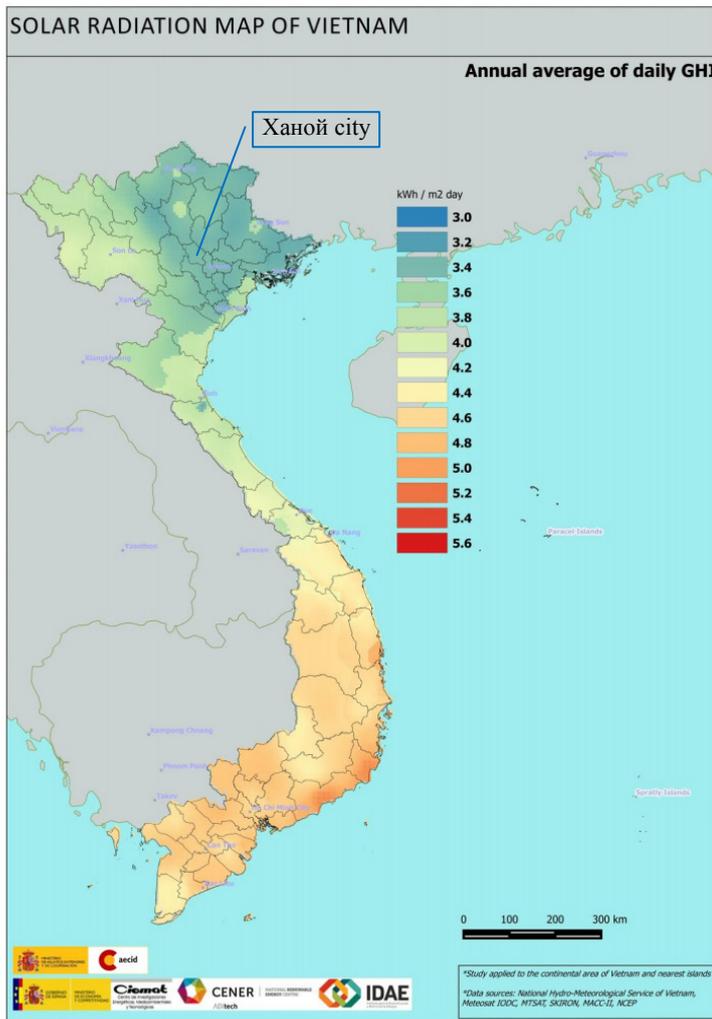


Рис. 3. Потенциал солнечной энергии во Вьетнаме [6]

Fig. 3. The potential of solar energy in Vietnam [6]

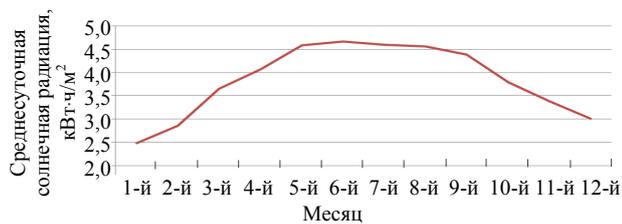


Рис. 4. Распределение среднесуточной радиации по месяцам в г. Ханое

Fig. 4. The distribution of average daily radiation by months in Hanoi

Коммерческое здание, на крыше которого установлена подключенная к сети солнечная электростанция, имеет географические координаты 21,3° с. ш. и 105,5° в. д. В здании используются различные виды электрического оборудования, такие как лифты, кондиционеры, холодильники, освеще-

ние и другое, поэтому ежемесячно потребляется большое количество электроэнергии. Поверхность крыши представляет собой потолочную систему большой площади, подходящую для установки солнечной электростанции (рис. 5).



Рис. 5. Коммерческое здание с установленной на нем солнечной электростанцией

Fig. 5. A commercial building with solar power station on its rooftop

Для достижения высокой эффективности преобразования солнечной энергии, а также для обеспечения простоты обслуживания и эстетики здания солнечные панели устанавливаются на крыше на кронштейнах под углом 5° в направлении на юг (рис. 6).

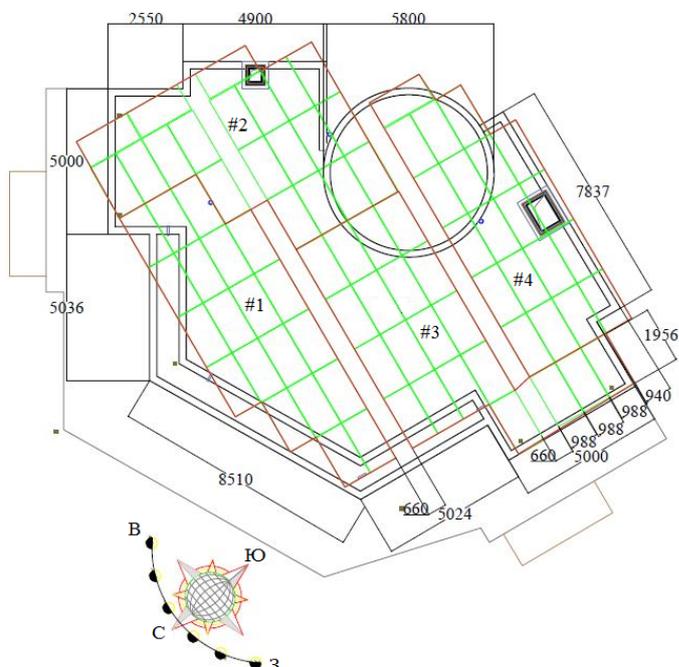


Рис. 6. Схема расположения солнечных панелей на крыше

Fig. 6. The layout of solar panels on the rooftop

Общая площадь крыши составляет около 255 м^2 , при этом она почти вся пригодна для размещения солнечной электростанции. На ней можно смонтировать четыре модуля, каждый из которых состоит из двадцати последовательно соединенных солнечных панелей из поликристаллического кремния мощностью 325 Втп. Таким образом, максимальная установленная мощность составляет 26 кВтп (80 солнечных панелей по 325 Втп). В данном случае выбрана система из четырех модулей солнечных элементов, подключенных к двум инверторам трехфазного тока мощностью 12 кВт, на каждый из которых приходится по два модуля.

Оборудование солнечной электростанции, подключенной к сети, представлено в табл. 2.

Таблица 2

Оборудование солнечной электростанции, подключенной к сети

Solar power station equipment connected to the grid

Оборудование	Единица измерения	Количество
Солнечная панель JA Solar 325 Втп	панель	80
Инвертор Growatt 12 кВт	шт.	2
Установочная арматура для панелей	комплект	1
Электрический шкаф	шт.	1
Вспомогательное оборудование (соединительные коробки, электрокабели, система заземления и др.)	комплект	1

В целом из-за ограниченной площади крыши мощность солнечной установки сможет только частично удовлетворить потребность всего здания в электроэнергии.

Потери, рассчитанные программным обеспечением PVsyst, включают два типа: потери PV array loss и System loss [12].

Результаты исследований

Программное обеспечение PVsyst используется для расчета выходной мощности, производительности, а также полных потерь станции, подключенной к сети.

Из диаграммы, представленной на рис. 7, видно, что потери электроэнергии солнечных батарей, связанные с температурным режимом, максимальны и составляют около 10,1 %. Это обусловлено большой разницей сезонных температур окружающего воздуха в Ханое. При стандартной рабочей температуре солнечных панелей ($25 \text{ }^\circ\text{C}$) разница с сезонными температурами в этой местности довольно высока: летом температура воздуха может достигать $40 \text{ }^\circ\text{C}$, а зимой понижаться до $8 \text{ }^\circ\text{C}$.

Наименьшие потери, соответствующие значению 0,1 %, наблюдаются в электрических соединительных кабелях, поскольку их длина не превышает 5 м.

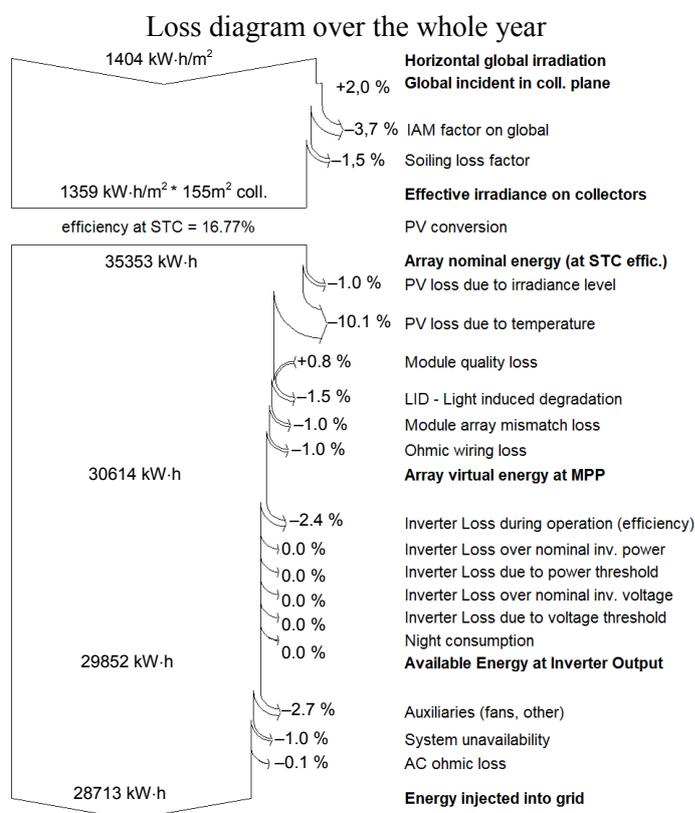


Рис. 7. Потери электроэнергии в системе солнечной электростанции, подключенной к сети

Fig. 7. Electricity losses in the grid-connected solar power system

Потери снижают количество энергии, передаваемой в сеть, и эффективность работы электростанции, подключенной к сети. Как показано на рис. 8, потери мощности, связанные с солнечными панелями, составляют ~0,7 кВт·ч/кВтп в сутки, в то время как потери в системе – около 0,2 кВт·ч/кВтп.

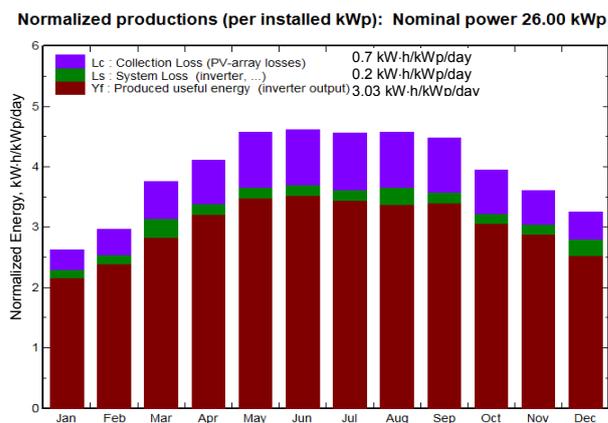


Рис. 8. Распределение потерь мощности по месяцам

Fig. 8. Power loss distribution by months

При этом полезная выходная мощность инвертора – около 3,03 кВт·ч/кВтп в сутки. На рис. 9 показана производительность солнечной электростанции, КПД которой в среднем составляет ~77,1 %.

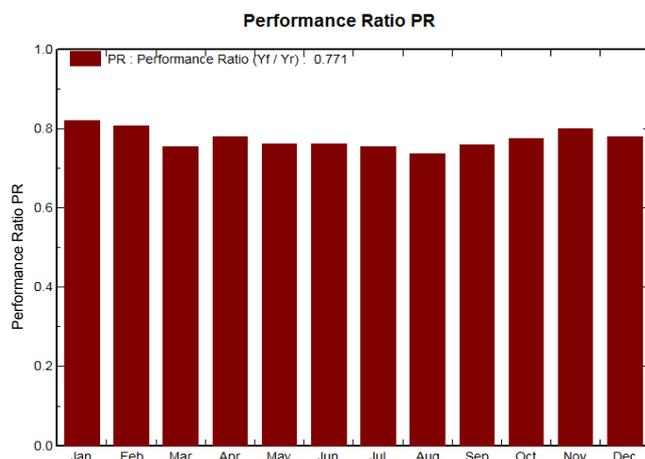


Рис. 9. Производительность исследуемой солнечной электростанции

Fig. 9. Productivity of the investigated solar power station

Очевидно, что мощность, передаваемая в сеть солнечной электростанцией, соответствует количеству солнечной радиации (табл. 3). С мая по сентябрь вырабатывается наибольшее количество электроэнергии, в январе и феврале – наименьшее. Поскольку солнечные панели установлены под углом 5°, значение солнечного излучения GlobInc примерно на 2 % выше, чем у горизонтально расположенных солнечных панелей GlobHor. Общий среднегодовой объем электроэнергии, который солнечная электростанция передает в сеть, составляет 28713 кВт·ч/год.

Таблица 3

Количество электроэнергии, полученной от подключенной к сети солнечной электростанции

The amount of electricity received from a solar power plant connected to the grid

	GlobHor, kW-h/m ²	T Amb, °C	GlobInc, kW-h/m ²	GlobEff, kW-h/m ²	EArray, kW-h	E_Grid, kW-h	EffArrR, %	EffSysR, %
January	77.2	11.70	81.4	76.8	1851	1737	14.66	13.75
February	80.1	13.50	83.2	78.7	1855	1745	14.38	13.54
March	113.5	17.20	116.3	110.4	2530	2284	14.03	12.67
April	122.1	21.50	123.1	116.8	2637	2499	13.81	13.09
May	142.3	24.20	141.6	134.7	2953	2803	13.45	12.77
June	140.1	26.10	138.6	131.7	2892	2747	13.45	12.78
July	142.6	26.30	141.3	134.3	2922	2771	13.33	12.65
August	141.4	26.00	141.7	134.7	2949	2715	13.42	12.36
September	131.7	24.30	134.3	127.8	2792	2650	13.41	12.72
October	117.5	21.10	122.2	116.1	2600	2466	13.72	13.01
November	101.7	17.30	108.2	102.4	2377	2253	14.16	13.42
December	93.6	13.29	100.7	94.9	2259	2043	14.47	13.09
Year	1403.8	20.24	1432.5	1359.3	30614	28713	13.78	12.93

Legends: GlobHor Horizontal global irradiation EArray Effective energy at the output of the array
 T Amb Ambient Temperature E_Grid Energy injected into grid
 GlobInc Global incident in coll. plane EffArrR Effic. Eout array / rough area
 GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings EffSysR Effic. Eout system / rough area

В соответствии с текущим графиком повышения цен на электроэнергию во Вьетнаме инвестиции в строительство на крышах зданий солнечных электростанций, подключенных к сети, могут быть экономически целесообразными, внося при этом положительный вклад в защиту окружающей среды и борьбу с изменением климата за счет сокращения выбросов CO₂. Среднегодовое снижение выбросов CO₂ рассчитывается по формуле

$$t_{CO_2e} = E_Grid \cdot EF_{grid} = 28713 \cdot 0,66 / 1000 = 18,9 \text{ т/год},$$

где E_Grid – среднегодовое количество электроэнергии, вырабатываемой солнечной электростанцией, МВт·ч; EF_{grid} – коэффициент выбросов CO₂ при производстве электроэнергии, во Вьетнаме EF_{grid} = 0,66 т CO₂/(МВт·ч) [13].

ВЫВОДЫ

1. Северо-восточный регион Вьетнама в целом и столица страны Ханой в частности оцениваются как районы, имеющие относительно средний потенциал солнечной радиации со среднегодовым значением около 3,85 кВт·ч/м² в сутки. Периоды с января по март и с октября по декабрь имеют самые низкие среднесуточные значения солнечной радиации, в то время как с апреля по октябрь они наивысшие.

2. Выходная мощность, количество передаваемой в сеть электроэнергии и эффективность работы солнечных электростанций зависят также от различных типов потерь. Потери в солнечных батареях максимально составляют ~10,1 %, что обусловлено большой разницей сезонных температур в Ханое. Таким образом, эффективность солнечной электростанции достигнет ~77,1 %. Строительство солнечных электростанций поможет уменьшить количество выбрасываемого CO₂, внесет положительный вклад в защиту окружающей среды и борьбу с изменением климата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Global Market Outlook for Solar Power 2018–2022 [Electronic Resource] // Solar Power Europe. Mode of Access: <https://www.solarpowereurope.org/global-market-outlook-2018-2022/>.
2. Марончук, И. И. Солнечные элементы: современное состояние и перспективы развития / И. И. Марончук, Д. Д. Санникович, В. И. Мирончук // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 2. С. 105–123. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123>.
3. Renewable Capacity Statistics 2018 [Electronic Resource] / International Renewable Energy Agency. Mode of access: <https://nangs.org/analytics/irena-renewable-capacity-statistics-2018-eng-pdf>.
4. Decision on the Support Mechanisms for the Development of Solar Power Projects in Vietnam: Prime Minister of Vietnam No: 11/2017/QĐ-TTg [Electronic Resource]. Mode of access: <https://ru.scribd.com/document/408725603/Decision-11-2017-of-PM-on-Solar-PV-FIT-Eng>.
5. Nguyen, Khanh Q. Alternatives to Grid Extension for Rural Electrification: Decentralized Renewable Energy Technologies in Vietnam / Khanh Q. Nguyen // *Energy Policy*. 2007. Vol. 35, No 4. P. 2579–2589. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.10.004>.
6. Maps of Solar Resource and Potential in Vietnam, 2015 [Electronic Resource] Ministry of Industry and Trade of the Socialist Republic of Vietnam. Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/288761369_Maps_of_Solar_Resource_and_Potential_in_Vietnam.
7. Khanh Toan, P. Energy Supply, Demand, and Policy in Viet Nam, with Future Projections / P. Khanh Toan, N. Minh Bao, N. Ha Dieu // *Energy Policy*. 2011. Vol. 39, No 11. P. 6814–6826. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.021/>.

8. Spatial Variability and Clustering of Global Solar Irradiation in Vietnam from Sunshine Duration Measurements / J. Polom [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 42. P. 1326–1334. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.014>.
9. Large-Scale Integration of Renewable Power Sources into the Vietnamese Power System / A. Kies [et al.] // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 125. P. 207–213. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.188/>.
10. Soualmia, A. Modeling and Simulation of 15 MW Grid-Connected Photovoltaic System Using Pvsyst Software / A. Soualmia, R. Chenni // *IEEE International Renewable and Sustainable Energy Conference*. Marrakech, 2016. P. 702–705. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2016.7984069>.
11. Shiva, Kumar B. Performance Evaluation of 10 MW Grid Connected Solar Photovoltaic Power Plant in India / B. Kumar Shiva, K. Sudhakar // *Energy Reports*. 2015. Vol. 1. P. 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2015.10.001>.
12. Pvsyst Photovoltaic Software [Electronic Resource]. Mode of access: <http://www.pvsyst.com/en/>.
13. Operational Manual for MRV on City-Level Climate Change Mitigation Actions / Japan International Cooperation Agency. 2017.

Поступила 11.09.2019 Подписана в печать 19.11.2019 Опубликована онлайн 31.01.2020

REFERENCES

1. Global Market Outlook for Solar Power 2018–2022. *Solar Power Europe*. Available at: <https://www.solarpowereurope.org/global-market-outlook-2018-2022/>.
2. Maronchuk I. I., Sanikovich D. D., Mironchuk V. I. (2019) Solar Cells: Current State and Development Prospects. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 105–123. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123> (in Russian).
3. International Renewable Energy Agency (2018) *Renewable Capacity Statistics 2018*. Available at: <https://nangs.org/analytics/irena-renewable-capacity-statistics-2018-eng-pdf>.
4. *Decision on the Support Mechanisms for the Development of Solar Power Projects in Vietnam*: Prime Minister of Vietnam No: 11/2017/QĐ-TTg. Available at: <https://ru.scribd.com/document/408725603/Decision-11-2017-of-PM-on-Solar-PV-FIT-Eng>.
5. Nguyen Khanh Q. (2007) Alternatives to Grid Extension for Rural Electrification: Decentralized Renewable Energy Technologies in Vietnam. *Energy Policy*, 35 (4), 2579–2589. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.10.004>.
6. Ministry of Industry and Trade of the Socialist Republic of Vietnam (2015) *Maps of Solar Resource and Potential in Vietnam*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/288761369_Maps_of_Solar_Resource_and_Potential_in_Vietnam.
7. Khanh Toan P., Minh Bao N., Ha Dieu N. (2011) Energy Supply, Demand, and Policy in Viet Nam, with Future Projections. *Energy Policy*, 39 (11), 6814–6826. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.021>.
8. Polom J., Gastón M., Vindel J. M., Pagola I. (2015) Spatial Variability and Clustering of Global Solar Irradiation in Vietnam from Sunshine Duration Measurements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1326–1334. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.014>.
9. Kies A., Schyska B., Thanh D. V., Lueder von Bremen L., Heinemann D., Schramm S. (2017) Large-Scale Integration of Renewable Power Sources into the Vietnamese Power System. *Energy Procedia*, 125, 207–213. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.188>.
10. Soualmia A., Chenni R. (2016) Modeling and Simulation of 15 MW Grid-Connected Photovoltaic System Using Pvsyst Software. *IEEE International Renewable and Sustainable Energy Conference*, Marrakech, 702–705. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2016.7984069>.
11. Shiva Kumar B., Sudhakar K. (2015) Performance Evaluation of 10 MW Grid Connected Solar Photovoltaic Power Plant in India. *Energy Reports*, 1, 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2015.10.001>.
12. *Pvsyst Photovoltaic Software*. Available at: <http://www.pvsyst.com/en/>.
13. Japan International Cooperation Agency (2017) *Operational Manual for MRV on City-Level Climate Change Mitigation Actions*.

Received: 11 September 2019 Accepted: 19 November 2019 Published online: 31 January 2020