УДК 551.5, 620.92

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ПРИМЕНИМОСТИ ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И РЕАНАЛИЗА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

С. Е. Фрид*, Н. В. Лисицкая, О. С. Попель

Представлено академиком РАН В.Е. Фортовым 20.06.2019 г.

Поступило 08.07.2019 г.

Выполнен анализ точности предсказания энергетических показателей автономных фотоэлектрических установок при использовании различных климатических баз данных (NASA POWER, SARAH-E, CLARA-A, ERA5, Meteonorm и др.) для некоторых географических точек в России путём сравнения с расчётом по данным Мирового центра радиационных данных. Показано, что рассмотренные базы данных обеспечивают разброс предсказаний требуемой мощности солнечной батареи на уровне 10–20% лишь при долях покрытия нагрузки за счёт солнечной энергии менее 70%. При больших долях покрытия погрешность предсказания требуемой мощности солнечной батареи может достигать сотен процентов.

Ключевые слова: автономная фотоэлектрическая установка, климатическая база данных, моделирование, доля покрытия нагрузки, спутниковые наблюдения, реанализ.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524886609-611>

Бурное развитие возобновляемой энергетики стимулирует разработку методов предсказания энергетических характеристик фотоэлектрических установок для оценки их технико-экономических показателей. Наиболее экономически привлекательны солнечные энергоустановки для потребителей, находящихся вне систем централизованного энергоснабжения [1], однако автономные установки требуют наличия накопителя энергии (НЭ). В отличие от электрической сети НЭ в автономной энергоустановке не может принять всю выработанную солнечной батареей (СБ) электроэнергию, и при моделировании необходимо учитывать различия в графиках нагрузки и прихода солнечного излучения.

Исходными данными для моделирования солнечных энергоустановок является в первую очередь информация о поступлении на земную поверхность солнечного излучения. Предпочтительны многолетние наземные актинометрические наблюдения, результаты которых собраны, например, в базах данных Мирового центра радиационных данных (МЦРД) [2]. Проблемой является малое количество актинометрических станций (на территории РФ их всего 27 [2]). Для решения проблемы используются данные спутниковых наблюдений и методы реанализа. Имеется несколько климатических баз данных, полностью или частично покрывающих территорию России: NASA POWER (с 1983 г., глобальная, пространственное разрешение $1^\circ \times 1^\circ$ по широте и дол-

готе [3]); базы данных Европейской системы мониторинга климата по спутниковым данным (CM SAF [4]): SARAH (1983–2017 гг., $\pm 65^\circ$ по широте и долготе, $0,05^\circ \times 0,05^\circ$), SARAH-E (1999–2016 гг., $\pm 65^\circ$ по широте, от -10° до $+130^\circ$ по долготе, $0,05^\circ \times 0,05^\circ$) и CLARA-A (1982–2015 гг., глобальная, $0,25^\circ \times 0,25^\circ$); Европейского центра среднесрочного прогноза погоды (ECMWF): ERA5 (1979–2018 гг., глобальная, $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ [5]).

Большинство климатических баз данных не ориентированы на расчёты солнечных установок, оценка применимости данных для таких расчётов проводится, как правило, сравнением с результатами наблюдений на метеостанциях [6–8]. Это позволяет оценить погрешность моделирования лишь сетевых солнечных станций, поскольку связь между поступлением солнечного излучения и графиком нагрузки не рассматривается с привязкой ко времени.

В настоящей работе анализ применимости различных источников климатической информации проведён сравнением результатов моделирования автономных фотоэлектрических установок. Рассмотрена упрощённая модель установки, работающей на потребителя с постоянной нагрузкой $P_{\text{нагр}}$ и содержащей СБ паспортной мощностью P и НЭ ёмкостью Q . Солнечная батарея ориентирована на юг, угол её наклона к горизонту считался превышающим широту на 15° , пересчёт сумм солнечного излучения с горизонтальной поверхности на наклонную осуществлялся с использованием моделей Рейндла (Reindl) [9]. КПД солнечной батареи и накопителя энергии считались постоянными, саморазряд нако-

Объединенный институт высоких температур
Российской Академии наук, Москва

*E-mail: s_frid@oivtran.ru

Рис. 1. Требуемая для обеспечения доли покрытия δ мощность солнечной батареи p в зависимости от времени работы нагрузки от аккумулятора τ для $\delta = 0,99$ во Владивостоке (а) и погрешность определения p в зависимости от δ в Екатеринбурге (б).

питателя не учитывался. Токи заряда и разряда НЭ при моделировании ограничивались невозможностью перезаряда или выхода в область отрицательного заряда на шаге моделирования.

В таком приближении солнечная энергоустановка характеризуется всего тремя параметрами: безразмерной паспортной мощностью солнечной батареи $p = P/P_{\text{нагр}}$, продолжительностью питания нагрузки от полностью заряженного накопителя $\tau = Q/P_{\text{нагр}}$ и долей покрытия нагрузки за счёт использования солнечной энергии δ . Целью расчёта было получение соотношений между p и τ , при которых обеспечивается заданная величина δ . Период моделирования составлял максимально возможную величину для каждой из баз климатических данных, при этом годы, когда в базе отсутствовали данные для двух дней подряд и более, из рассмотрения исключались. Расчёт выполнялся для перечисленных выше баз климатических данных, а также широко применяемых синтетических метеорологических годов “Meteonorm” [10] для Москвы, Санкт-Петербурга, Владивостока, Самары, Екатеринбурга и Якутска. В качестве опорных данных для сравнения полученных результатов использовались результаты наземных актиометрических наблюдений МЦРД. Некоторые результаты иллюстрирует рис. 1.

С ростом ёмкости аккумулятора (рис. 1а) различия между значениями p , рассчитанными по различным данным, уменьшаются, как и сами мощности, асимптотически приближающиеся к минимальным значениям при бесконечно больших ёмкостях НЭ (работе на сеть). Эти значения можно определить из равенства генерируемой электроэнергии и энергии, требуемой для покрытия нагрузки за рассматрива-

емое время, для различных баз климатических данных в рассмотренных географических точках они отличаются на 2–15%.

Наряду с минимальной мощностью СБ существует и минимальная ёмкость накопителя, при которой обеспечивается заданная доля покрытия нагрузки. При $\delta = 100\%$ найти её просто: НЭ должен обеспечивать энергией нагрузку в течение самой длинной ночи в году (15–18 ч для интервала широт 43° – 60°). Оценить минимальную ёмкость НЭ при $\delta < 100\%$ можно, если предположить, что в дневное время нагрузка покрывается полностью (это даёт оценку ёмкости накопителя снизу). Тогда минимальное время работы нагрузки от НЭ составит $12(2\delta - 1)$, что даёт 5–10 ч для $\delta = 70$ – 90% .

При доле покрытия нагрузки менее 70% значения p , рассчитанные по данным из различных баз, отличаются на 10–20%. С ростом доли покрытия (рис. 1б) эта погрешность растёт, и при работе солнечной энергоустановки в режиме, близком к полной автономности ($\delta \approx 100\%$), и характерной для практического применения ёмкости НЭ ($\tau < 200$ ч) требуемые p для различных источников данных могут различаться в 2–3 раза. При этом невозможно однозначно выделить базы климатических данных, обеспечивающие лучшее, чем другие, приближение к значениям p , полученным по результатам наземных измерений. Так, предположение, что высокое пространственное разрешение баз данных SARAH и SARAH-E позволит обеспечить минимальную погрешность расчёта p , верно лишь для некоторых географических точек, но, по крайней мере, в Екатеринбурге данные базы SARAH-E приводят к максимальной погрешности.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Анализ точности предсказания энергетических показателей автономных фотоэлектрических установок, расположенных в южных и среднеширотных географических точках России, при использовании различных климатических баз данных показал, что разброс в определении требуемой мощности солнечной батареи по рассмотренным базам не превышает 10–20% лишь при значениях доли покрытия нагрузки за счёт солнечной энергии не более 70%, и для таких условий в расчётах можно использовать данные баз спутниковых наблюдений и реанализа.

2. При расчёте показателей солнечных энергоустановок, работающих в режиме, близком к полной автономности, при ёмкости НЭ, обеспечивающей менее 200 ч работы нагрузки, рассчитываемая на основе различных баз данных и реанализов требуемая мощность солнечной батареи может различаться в 2–3 раза, что обуславливает необходимость дополнительного обоснования выбора для адекватных расчётных исследований источников исходной актинометрической информации.

3. Погрешность расчётного определения мощности солнечных батарей с использованием данных из различных климатических баз существенно зависит от выбранной ёмкости накопителя энергии, и с её ростом разброс предсказаний уменьшается. В предельном случае — установка с накопителем энергии бесконечной ёмкости — отличие предсказываемых мощностей для рассмотренных баз данных от полученных по данным наземных измерений составляет 2–15%. При этом полное покрытие нагрузки за счёт солнечной энергии возможно, лишь если ёмкость накопителя энергии обеспечивает питание нагрузки непрерывно не менее 15–18 ч.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках Госзадания ОИВТ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фортков В.Е., Попель О.С.* Возобновляемая энергетика в современном мире. М.: Издательский дом МЭИ, 2015.
2. МЦРД. Доступно по http://wrdc.mgo.rssi.ru/wwwrootnew/wrdc_ru_new.htm. Ссылка активна на 18 июня 2019 г.
3. NASA Prediction of Worldwide Energy Resources. Доступно по <https://power.larc.nasa.gov/>. Ссылка активна на 18 июня 2019 г.
4. CM SAF — Product navigator. Доступно по <https://wui.cmsaf.eu/safira/action/viewProduktSearch>. Ссылка активна на 18 июня 2019 г.
5. Copernicus. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. Доступно по <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>. Ссылка активна на 18 июня 2019 г.
6. *Bojanowski J.S., Vrieling A., Skidmore A.K.* A comparison of data sources for creating a long-term time series of daily gridded solar radiation for Europe // *Solar Energy*. 2014. V. 99. P. 152–171.
7. *Urraca R., Huld T., Cracia-Amillo A., et al.* Evaluation of global horizontal irradiance estimates from ERA5 and COSMO-REA6 reanalyses using ground and satellite-based data // *Solar Energy*. 2018. V. 164. P. 339–354.
8. *Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г. и др.* Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. М.: Изд-во МФТИ, 2010.
9. *Даффи Дж., Бекман У.* Основы солнечной теплоэнергетики. Долгопрудный: Издательский дом “Интеллект”, 2013.
10. Meteonorm. Irradiation data for every place on Earth. Доступно по: <https://meteonorm.com/en/>. Ссылка активна на 18 июня 2019 г.

RESULTS OF APPLICABILITY ANALYSIS OF SATELLITE OBSERVATIONS AND REANALYSIS DATA FOR AUTONOMOUS PHOTOVOLTAIC UNITS SIMULATION

S. E. Frid, N. V. Lisitskaya, O. S. Popel

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Presented by Academician of the RAS V.E. Fortov June 20, 2019

Received July 8, 2019

The accuracy analysis of energy performance prediction of autonomous photovoltaic units using various climate databases (NASA POWER, SARAH-E, CLARA-A, ERA5, Meteonorm, etc.) for some geographic points in Russia was performed by comparing with calculations using data of World Radiation Data Center. It is shown that the considered databases provide a spread of predictions of the required power of solar battery at the level of 10–20% only when solar fraction is less than 70%. For larger solar fraction, the prediction error of the required power of solar battery can reach hundreds of percent.

Keywords: autonomous PV unit, climatic database, simulation, solar fraction, satellite data, reanalysis.