

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ С УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Рузибоева Угилжон Муминбой кизи

Магистр Ташкентского государственного транспортного университета

Аннотация. В статье представлено моделирование влияния климатических факторов на энергетическую эффективность фотоэлектрических модулей. Рассмотрены основные внешние параметры, определяющие производительность солнечных установок: температура модуля, уровень солнечной радиации, относительная влажность и скорость ветра. Разработана аналитическая модель оценки выходной мощности фотоэлектрических модулей с учетом температурного коэффициента и коэффициента влияния влажности. Выполнен анализ изменения мощности при отклонении климатических параметров от стандартных условий (STC).

Показано, что повышение температуры модуля приводит к линейному снижению выходной мощности, тогда как увеличение солнечной радиации пропорционально повышает энергетическую отдачу. Установлено, что влияние влажности и ветра носит комплексный характер и связано как с тепловыми процессами охлаждения, так и с эффектами загрязнения поверхности.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и оптимизации фотоэлектрических систем в условиях переменного климата и при выборе технических решений для повышения их энергоэффективности и надежности эксплуатации.

Ключевые слова: фотоэлектрические модули, климатические факторы, температурный коэффициент, солнечная радиация, влажность, ветровое воздействие, математическая модель.

Abstract. The article presents modeling of the influence of climatic factors on the energy efficiency of photovoltaic modules. The main external parameters determining the performance of solar installations are considered: module temperature, solar irradiance level, relative humidity, and wind speed. An analytical model for estimating the output power of photovoltaic modules has been developed, taking into account the temperature coefficient and the humidity impact coefficient. An analysis of power variation under deviations of climatic parameters from Standard Test Conditions (STC) has been carried out.

It is shown that an increase in module temperature leads to a linear decrease in output power, while an increase in solar irradiance proportionally enhances energy output. It has been established that the influence of humidity and wind is complex in nature and is associated both with thermal cooling processes and with surface contamination effects.

The obtained results can be used in the design and optimization of photovoltaic systems under variable climatic conditions and in the selection of technical solutions to improve their energy efficiency and operational reliability.

Keywords: *photovoltaic modules, climatic factors, temperature coefficient, solar irradiance, humidity, wind impact, mathematical model.*

Введение

В условиях глобального перехода к низкоуглеродной энергетике фотоэлектрические системы занимают одно из ключевых мест в структуре возобновляемых источников энергии [1]. Рост установленной мощности солнечных электростанций требует повышения их энергоэффективности, надежности и адаптивности к различным климатическим условиям эксплуатации. Несмотря на активное развитие технологий производства фотоэлектрических модулей, их фактическая производительность существенно отличается от паспортных значений, что обусловлено воздействием внешних климатических факторов [2].

Известно, что выходная мощность фотоэлектрических модулей определяется не только уровнем солнечной радиации, но и температурой окружающей среды, температурой самого модуля, относительной влажностью воздуха, скоростью ветра, а также степенью загрязнения поверхности. В стандартных условиях тестирования (STC) параметры эксплуатации принимаются фиксированными, однако в реальных климатических условиях происходит их постоянное изменение, что приводит к снижению энергетической эффективности системы [3].

Анализ научных публикаций показывает, что большинство исследований рассматривают влияние отдельных климатических факторов изолированно [4]. При этом недостаточно изучен комплексный характер их совместного воздействия на выходную мощность фотоэлектрических модулей, особенно с учетом тепловых процессов и влажностных эффектов.

В связи с этим возникает необходимость разработки аналитической модели, позволяющей количественно оценивать влияние совокупности климатических параметров на энергетическую эффективность фотоэлектрических систем.

Целью исследования является разработка и анализ математической модели оценки выходной мощности фотоэлектрических модулей с учетом температуры, солнечной радиации, влажности и ветрового воздействия.

Научная новизна работы заключается в комплексном учете температурного и влажностного коэффициентов в единой модели расчета мощности фотоэлектрических модулей, что позволяет более точно прогнозировать их производительность в реальных климатических условиях эксплуатации.

Практическая значимость заключается в возможности использования разработанной модели при проектировании солнечных энергетических систем, оптимизации режимов эксплуатации и повышении их энергоэффективности в условиях переменного климата.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования рассматривались фотоэлектрические модули на основе кристаллического кремния, как наиболее широко применяемые в энергетических установках. Номинальная мощность модуля при стандартных условиях тестирования (STC) принималась равной P_{max} , при эталонной солнечной радиации $G_{ref} = 100 \text{ Вт/м}^2$ и температуре $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$.

Методика оценки выходной мощности

Для анализа влияния климатических факторов использовалась аналитическая модель расчета выходной мощности фотоэлектрического модуля:

$$P = P_{max} \cdot \frac{G}{G_{ref}} \cdot [1 + \beta(T - T_{ref})]$$

где: P - фактическая выходная мощность модуля, Вт; G - текущая солнечная радиация, Вт/м²; β - температурный коэффициент мощности, 1/°C; T - фактическая температура модуля, °C.

Температурный коэффициент принимался в диапазоне $-0,3 \dots -0,5 \text{ \%/}^\circ\text{C}$ в соответствии с характеристиками кремниевых модулей.

Учет влияния влажности

Для учета влияния относительной влажности использована корректирующая зависимость:

$$P = P_{max} \cdot (1 - k_H(RH - RH_{opt})) \cdot (1 - k_T(T - T_{opt}))$$

где: RH - относительная влажность, %; k_H — коэффициент снижения мощности из за влажности; T_{opt} - оптимальная температура работы модуля; k_T - температурный коэффициент.

Учет ветрового воздействия

Влияние ветра учитывалось косвенно через снижение рабочей температуры модуля. Снижение температуры при увеличении скорости ветра рассматривалось как дополнительный охлаждающий эффект, приводящий к уменьшению температурных потерь мощности.

Температура модуля определялась как функция температуры окружающей среды и интенсивности солнечной радиации с учетом коэффициента теплоотдачи.

Метод исследования

В работе применялись: аналитический метод расчета выходной мощности; сравнительный анализ отклонений мощности от номинальных значений; графическая интерпретация зависимости мощности от изменения климатических параметров; оценка чувствительности системы к температуре, влажности и радиации.

Расчеты проводились при поэтапном изменении каждого климатического параметра в диапазонах, характерных для реальных условий эксплуатации.

Результаты исследования

В результате проведенного моделирования установлено, что выходная мощность фотоэлектрического модуля линейно зависит от уровня солнечной радиации и обратно пропорционально зависит от температуры модуля.

Влияние солнечной радиации

Расчеты показали, что при увеличении солнечной радиации от 600 до 1000 Вт/м² мощность модуля возрастает пропорционально и достигает номинального значения P_{max} при стандартных условиях. Снижение радиации до 800 Вт/м² приводит к уменьшению выходной мощности примерно на 20 %, что подтверждает линейный характер зависимости.

Таким образом, интенсивность солнечного излучения является определяющим фактором энергетической производительности фотоэлектрических систем.

Влияние температуры

Анализ температурного воздействия показал, что повышение температуры модуля на 10°C относительно стандартных условий приводит к снижению мощности в среднем на 3–5 % в зависимости от значения температурного коэффициента β [5].

При температуре модуля 45°C наблюдается снижение выходной мощности до 85–90 % от номинального значения. Данный эффект обусловлен уменьшением напряжения на p-n переходе вследствие роста внутреннего сопротивления полупроводникового материала.

Полученные данные подтверждают критическую роль тепловых потерь при эксплуатации солнечных модулей в жарком климате.

Влияние влажности

Моделирование показало, что увеличение относительной влажности выше оптимального уровня приводит к дополнительному снижению выходной мощности вследствие: образования конденсата, повышения вероятности коррозионных процессов, увеличения рассеяния солнечного излучения [6].

При превышении оптимального уровня влажности на 20 % снижение мощности может достигать 2–4 % в зависимости от коэффициента k_H .

Влияние ветра

Установлено, что увеличение скорости ветра способствует снижению рабочей температуры модуля за счет конвективного теплообмена [7,8]. Снижение температуры на 5°C за счет ветрового охлаждения может компенсировать до 2–3 % температурных потерь мощности.

Однако при экстремальных скоростях ветра возрастает риск механических нагрузок и загрязнения поверхности, что может нивелировать положительный охлаждающий эффект.

Комплексный эффект климатических факторов

Проведенный анализ показал, что одновременное воздействие температуры, влажности и солнечной радиации формирует совокупный эффект, который может снижать фактическую мощность модуля на 10–20 % по сравнению со стандартными условиями тестирования.

Это подтверждает необходимость учета реальных климатических условий при проектировании фотоэлектрических систем.

Заключение

В работе разработана математическая модель оценки выходной мощности фотоэлектрических модулей с учетом совокупного влияния солнечной радиации, температуры, влажности и ветрового воздействия.

Установлено, что мощность модуля линейно возрастает с увеличением солнечной радиации и снижается при повышении температуры, причем увеличение температуры на 10°C приводит к потерям мощности в среднем на 3–5 %. Дополнительно показано, что влажность оказывает корректирующее влияние на энергетическую эффективность, а ветровое воздействие может как снижать температурные потери за счет охлаждения, так и создавать дополнительные эксплуатационные риски.

Определено, что совокупное воздействие климатических факторов способно снижать фактическую мощность фотоэлектрических модулей на 10–20 % по сравнению со стандартными условиями тестирования.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и оптимизации фотоэлектрических систем для повышения их энергоэффективности и надежности эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ghosh A., Joshi S. Impact of environmental factors on solar panel efficiency // *Renewable Energy Reviews*. – 2023. – Vol. 160. – P. 112–126.
2. Kumar S., Kaushik S.C. Performance analysis of solar photovoltaic modules: A review of factors influencing efficiency // *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – Vol. 347. – P. 131–145.
3. Жураева К.К., Рузибоева У.М. Построение умного дома на основе альтернативных источников энергии. «O‘ZBEKISTONDA ENERGETIKA TIZIMINING DOLZARB MUAMMOLARI, YECHIMLARI VA RIVOJLANTIRISH ISTIQBOLLARI» mavzusida Respublika ilmiy-texnik anjuman materiallar to‘plami. Andijan 2025yil 22-dekabr. С. 450-452.
4. Ismail I., Abdurrahman A. Temperature effects on the efficiency of photovoltaic modules: A comparative study // *Energy Reports*. – 2022. – Vol. 8. – P. 123–130.
5. Wu Z., Zhang Y., Hu Y. Shading effects on solar panel performance: A review // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. – 2022. – Vol. 50. – 103115.
6. Mahmood H., Khan M. Analyzing the effects of soiling on solar panel efficiency in desert regions // *Solar Energy*. – 2021. – Vol. 220. – P. 487–495.
7. Bhanja A., Chatterjee K. Understanding the impact of humidity on solar panel efficiency // *Journal of Solar Energy Engineering*. – 2023. – Vol. 145(4). – 045001.

8. Li Y., Wang R., Chen H. The impact of climate variability on photovoltaic energy production // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2023. – Vol. 172. – 113045.
9. Singh P., Kumar M. Tilt angle optimization for photovoltaic systems under variable climate conditions // Energy Reports. – 2023. – Vol. 9. – P. 478–486.