АННОТАЦИЯ

к диссертационной работе на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе «8D06201 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

ӘЛМЕН ДИНАРА БАҚЫТЖАНҚЫЗЫ

Повышение эффективности фотоэлементов в условиях низкой концентрации солнечного излучения с адаптивной системой охлаждения

Общая характеристика работы. Диссертационная работа посвещяна повышению эффективности низкоконцентрационной фотоэлектрической системы на основе поликристаллического кремния за счёт увеличения угла приёма и внедрения адаптивной системы охлаждения с использованием технологии Интернета вещей.

Актуальность темы. Современные исследования в области концентрированных фотоэлементов направлены на повышение эффективности преобразования солнечной радиации, снижение стоимости оборудования, увеличение срока службы систем и улучшение их работы в различных климатических условиях.

Наиболее перспективным направлением, сочетающим высокую эффективность и низкие затраты, являются низкоконцентрационные фотоэлектрические системы. Системы с низкой концентрацией, использующие линзу Френеля, обычно называются традиционными низкоконцентрированными системами. Они позволяют использовать доступные поликристаллические фотоэлементы без необходимости применения дорогих многопереходных технологий. Однако их конструкция по-прежнему сталкивается с рядом проблем, связанных с оптикой и охлаждением фотоэлемента. Одна из них – ограниченный угол приёма. Из-за ограниченной площади фотоэлектрического элемента в концентрирующих системах для улавливания максимального потока солнечного излучения требуются дополнительные системы слежения за Солнцем. Однако это увеличивает сложность конструкции и приводит к дополнительным энергетическим затратам. Для обеспечения эффективной концентрации излучения на фотоэлектрическом элементе при различных углах падения в зависимости от траектории движения солнца необходимо расширять угол приема оптической системы. Реализация данного подхода позволяет снизить зависимость от систем слежения за Солнцем и повысить эффективность преобразования.

Другой важной задачей является управление температурным режимом. При концентрации солнечной радиации температура фотоэлементов значительно возрастает, что приводит к снижению их эффективности и ускоренной деградации. Для предотвращения перегрева применяются активные системы охлаждения – чаще всего с использованием воды или воздуха. Системы активного охлаждения требуют использования вспомогательных компонентов, что снижет общую эффективность преобразования. Поэтому для обеспечения оптимальной производительности крайне важно регулировать их работу в соответствии с температурным состоянием фотоэлемента.

В традиционных системах охлаждения с водой система включается при превышении заданного порога температуры фотоэлемента, и охлаждение продолжается до достижения заданного минимального значения. При этом расход воды поддерживается на постоянном уровне, что приводит к постоянному энергопотреблению насоса. Однако продолжительность охлаждения зависит как от мощности солнечного излучения, так и от конфигурации подключения фотоэлектрических элементов. Поддержание постоянного расхода воды в условиях низкой радиации приводит к перерасходу энергии, а при высокой радиации фиксированный режим не обеспечивает достаточной скорости отвода тепла.

Таким образом, разработка низкоконцентрационной фотоэлектрической системы на основе поликристаллического кремния с оптическими элементами, обеспечивающими широкий угол приёма, является актуальной задачей. Это позволит сократить частоту включения трекера и использовать простые одноосевые системы слежения с минимальным энергопотреблением. Более того, интеграция системы водяного охлаждения с технологиями Интернета вещей позволяет осуществлять адаптивное управление системой охлаждения с поддержкой беспроводной передачи данных и мониторинга в режиме реального времени. Такой подход снижает эксплуатационные расходы, повышает её надёжность и управляемость, что подчёркивает актуальность и востребованность данного исследования.

Цель исследования. Повышение эффективности низкоконцентрированных фотоэлектрических систем на основе поликристаллического кремния за счет использования оптических элементов с широким углом приема и адаптивной системы охлаждения на основе воды.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- смоделировать низкоконцентрационную фотоэлектрическую систему на основе плоской вогнутой линзы и линзы Френеля и исследовать её оптические параметры;
- исследовать систему слежения за Солнцем низкоконцентрационной фотоэлектрической установки на основе плоской вогнутой линзы и линзы Френеля и сравнить её с традиционными низкоконцентрационными фотоэлектрическими системами;
- смоделировать П-образную низкоконцентрационную фотоэлектрическую систему, исследовать её оптические параметры и сравнить выходную мощность с различными низкоконцентрационными фотоэлектрическими системами;
- исследовать параметры низкоконцентрационного фотоэлемента при различных уровнях солнечной радиации и режимах охлаждения, а также разработать адаптивную систему охлаждения для повышения эффективности.

Методы исследования:

- численное моделирование и оптический анализ с помощью трассировки лучей в среде COMSOL Multiphysics – анализ прохождения, отражения и концентрации солнечного излучения в низкоконцентрационных оптических системах с различными углами падения и на основе различных оптических элементов;

- математическое моделирование в среде MATLAB – расчёт выходной мощности, коэффициента концентрации и оптимизация геометрических параметров системы;
- сравнительный анализ энергетической производительности предложенных низкоконцентрационных систем и традиционных низкоконцентрационных систем на основе моделирования;
- применение методов машинного обучения (XGBoost-регрессия, линейная регрессия, регрессия опорных векторов, деревьев решений и случайный лес) для оценки оптической эффективности при различных углах падения.

Объект исследования. Низкоконцентрационная фотоэлектрическая система на основе поликристаллического кремния с адаптивной системой охлаждения

Предмет исследования. Геометрические параметры оптических элементов, применяемых в низкоконцентрационных фотоэлектрических системах; влияние концентрирующих компонентов на параметры и выходные характеристики фотоэлектрической системы; процессы охлаждения и распределения температуры на поверхности фотоэлементов.

Научная новизна. Впервые:

- исследовано применение плосковогнутой линзы, линзы Френеля и отражающих поверхностей в низкоконцентрированной фотоэлектрической системе, при котором установлено, что использование такой оптики обеспечивает значительное увеличение значения произведения коэффициента концентрации и угла приёма (concentration acceptance product – CAP) по сравнению с традиционными системами.
- установлено, что использование низкоконцентрированной фотоэлектрической системы с плосковогнутой линзой, линзой Френеля и отражающими поверхностями позволяет сократить использование системы слежения за Солнцем за счет увеличения угла приема.
- предложена система с низкой концентрацией на основе линзы Френеля и отражающих поверхностей с девятью поликристаллическими кремниевыми фотоэлементами, и обнаружено, что оптическое решение позволяет использовать одноосный трекер и вырабатывает больше энергии по сравнению с фиксированной неконцентрированной системой.
- разработан адаптивный алгоритм охлаждения для фотоэлектрической системы с низкой концентрацией, который, в отличие от традиционных подходов с постоянным потоком, регулирует поток воды в зависимости от солнечного излучения и температуры фотоэлементов, тем самым снижая потребление энергии на охлаждение.

Положения, выносимые на защиту:

- Низкоконцентрированная фотоэлектрическая система с плосковогнутой линзой, линзой Френеля и отражающими поверхностями показывает значение произведения коэффициента концентрации и угла приёма (CAP) в 2,9 раза выше по сравнению с традиционной низкоконцентрированной фотоэлектрической системой.
- Низкоконцентрированная фотоэлектрическая система на основе плосковогнутой линзы, линзы Френеля и отражающих поверхностей снижает энергопотребление системы слежения за Солнцем на 27%, по сравнению с традиционной низкоконцентрированной фотоэлектрической системой.

- П-образная система с низкой концентрацией, установленная на одноосный солнечный трекер вырабатывает в 2,2 раза больше энергии по сравнению с фиксированным фотоэлектрическим модулем.
- Алгоритм адаптивного управления системой охлаждения снижает энергопотребление системы на 12% по сравнению с традиционной системой.

Научно-практическая значимость работы. Проведенное исследование востребовано в условиях растущего спроса на фотоэлектрические системы и необходимости снижения эксплуатационных расходов. Разработанные оптические решения позволяют существенно повысить оптическую эффективность и угол прием таких систем, что снижает требования к точности и сложности системы слежения за Солнцем, уменьшает их энергопотребление. Особое внимание уделено важности использования эффективных систем охлаждения, обеспечивающих равномерное распределение температуры по поверхности фотоэлементов и сокращающих время их охлаждения, что повышает долговечность, стабильность работы и общую эффективность фотоэлектрических установок в условиях переменного солнечного излучения и колебаний температуры.

Надёжность и обоснованность полученных результатов. Корректность результатов диссертационной работы подтверждается наличием публикаций в зарубежных журналах с импакт-фактором выше нуля.

Личный вклад автора. Автор самостоятельно выполнил все части исследовательской работы, включая разработку и моделирование низкоконцентрированной фотоэлектрической системы в среде COMSOL Multiphysics, а также создание и оптимизацию адаптивной системы водяного охлаждения. Расчёт выходной мощности и численный анализ характеристик системы проводились в среде MATLAB. Постановка задач и обсуждение результатов осуществлялись совместно с научными руководителями.

Апробация работы. Результаты, полученные в диссертационной работе, опубликованы, докладывались и обсуждались:

Статьи опубликованы в изданиях, входящих в международные научные базы данных Thomson Reuters и Scopus:

1. Orynbassar S., **Almen D.**, Mekhilef S., Kapparova A., Dosymbetova G., Nurgaliyev M., Saymbetov A., Ibraimov M., Kuttybay N., Yershov E., Koshkarbay N., Zholamanov B., Bolatbek A. Minimum solar tracking system for a Fresnel lens-based LCPV // Renewable Energy. – 2024. – Vol. 237. – 121607 (https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121607). (WoS: Impact Factor 9.1, Q1. Scopus: percentile 98 %)
2. **Almen D.**, Kapparova A., Yershov E., Orynbassar S., Dosymbetova G., Nurgaliyev M., Saymbetov A., Kuttybay N., Zholamanov B., Bolatbek A., Koshkarbay N. Output power analysis of low concentrated solar cells with Fresnel lens optics // Optik. – 2024. – Vol. 317. – P. 172088 (https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2024.172088). (Scopus : percentile 85 %)
3. Kapparova A., Orynbassar S., Dosymbetova G., **Almen D.**, Yershov E., Saymbetov A., Nurgaliyev M., Kuttybay N., Algazin N. Modelling of the Pi-Shape Low-Concentrating Photovoltaic Solar Cells // IIUM Engineering Journal. – 2025. – Vol. 26, No. 2. – P. 81–95 (https://doi.org/10.31436/iiumej.v26i2.3175). (WoS: Impact Factor 0.7, Q3. Scopus : percentile 50 %)

4. Kapparova A., Orynbassar S., Dosymbetova G., **Almen D.**, Yershov E., Saymbetov A., Nurgaliyev M., Algazin N., Sharipbay A., Zhastalapova D. Modeling П-shaped concentrating optics for LCPV solar cells using Fresnel lens // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. – 2024. – No. 5. – P. 101–116 (DOI:10.2478/lpts-2024-0039). (WoS: Impact Factor 0.7, Q4. Scopus: percentile 37 %)

5. Orynbassar S., Kapparova A., Dosymbetova G., **Almen D.**, Yershov E., Saymbetov A., Nurgaliyev M., & Zholamanov B. Simulation of an active cooling system for low-concentrating photovoltaic solar cells // Acta Polytechnica. – 2025. – Vol. 65, No. 4. – P. 429–441 (https://doi.org/10.14311/AP.2025.65.0429) (WoS: Impact Factor 0.5, Q4. Scopus: percentile 32 %)

Патент и авторское право

1. Құттыбай Н. Б., Орынбасар С. О., Саймбетов А. К., Нұрғалиев М. К. Ибраимов М. К., Досымбетова Г. Б., Болатбек А. Б., Қошқарбай Н. Ж., Жоламанов Б. Н., Каппарова А. А., **Әлмен Д. Б.** Низкоконцентрированная фотоэлектрическая система с минимальным слежением за солнцем // Республика Казахстан, «Национальный институт интеллектуальной собственности», патент на изобретение №37370 – 2025.

2. **Әлмен Д.Б.**, Ибраимов М.К., Нұрғалиев М.К., Саймбетов А.К., Бүркіт Ш. А. Адаптивная система охлаждения низкоконцентрированных фотоэлектрических систем. Республики Казахстан, «Национальный институт интеллектуальной собственности», ссвидетельство об авторском праве № 62891–2025 г.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 108 источников. Объем работы составляет 107 страниц, включая 79 рисунок и 7 таблиц.

В первой главе диссертации рассматриваются оптические элементы и методы охлаждения, используемые в концентрирующих системах, в том числе в фотоэлектрических системах с низкой концентрацией.

Во второй главе диссертации исследуются общие характеристики и выходные параметры низкоконцентрированной фотоэлектрической системы на основе линзы Френеля с плосковогнутой линзой и отражающими поверхностями.

Третья глава посвящена низкоконцентрационной фотоэлектрической системе на основе линзы Френеля с П-образными отражающими поверхностями, исследованию ее оптических параметров и системы охлаждения.

В четвертой главе исследуется адаптивная система охлаждения фотоэлектрической системы низкой концентрации и ее выходные параметры.

Диссертационная работа частично выполнена соответствии с планами научно-исследовательской работы (НИР): «Исследование эффективности кремниевых фотоэлектрических преобразователей с новой адаптированной системой охлаждения в условиях концентрации солнечного излучения» на 2023–2025 годы, индивидуальный регистрационный номер (ИРН) AP19574454.