

знергоэффективности Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь, 2011. 8 с.

2. Hybrid power systems based on renewable energies: a suitable and cost-effective solutions for rural electrification. Alliance for rural electrification, 2020.

3. Hybrid Power Plant [Electronic resource] // Enertrag. - 2022. Mode of access: <https://www.enertrag.com/en/project-development/hybrid-power-plant.html>. – Date of access: 31.10.2025.

4. Ветровые электростанции [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://viter.com.ua/energiya-vetra-i-solnca-v-ukraine-prakticheskij-primer-190.htm>. 2019.

5. Альтернативная энергетика [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://alternativenergy.ru/vetroenergetika/117-shema-vetrogeneratora.html> - 2022. Дата доступа: 31.09.2025.

УДК 519.87

Барайшук С.М., к.ф.-м.н., доцент,

Нефедов С.С., ст. преподаватель, Кленицкий Я.Л., студент
*Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск*

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Эффективность и рентабельность солнечных электростанций напрямую зависят от долговечности и надежности фотоэлектрических модулей (ФЭМ). Одной из наиболее значимых проблем, приводящих к существенному снижению мощности и сокращению срока службы ФЭМ, является потенциально индуцированная деградация (PID – Potential Induced Degradation).

PID представляет собой процесс постепенного ухудшения характеристик солнечного элемента, вызванный воздействием высокого напряжения относительно земли. Данное явление приводит к миграции ионов, образованию токов утечки и, как следствие, к потере мощности модуля, которая в тяжелых случаях может достигать 50% и более [1]. Визуально PID часто проявляется в виде потемнений, затемненных участков или ячеек на поверхности модуля, что делает возможным его оптическое обнаружение.

Бурное развитие технологий искусственного интеллекта, в частности, глубокого обучения и сверточных нейронных сетей (CNN), открывает новые возможности для автоматизации процесса анализа изображений. CNN показали выдающиеся результаты в задачах компьютерного зрения, включая классификацию и обнаружение дефектов в различных отраслях промышленности [2, 3]. CNN являются особенно подходящими для задачи обнаружения визуальных дефектов на солнечных панелях, где признаки PID могут иметь разный вид, размер и расположение.

Для данной работы была выбрана архитектура VGG16 в качестве базовой модели для обучения. Для исследования был собран специализированный датасет изображений солнечных панелей. Съемка контрольных образцов и панелей с искусственно индуцированным PID в контролируемых условиях освещения с использованием цифровой зеркальной камеры (Nikon D5600) для обеспечения высокого разрешения и детализации. Съемка функционирующих солнечных панелей на реальной солнечной электростанции с использованием различных смартфонов (Samsung Galaxy S21, iPhone 12) для обеспечения разнообразия условий и углов съемки. Это включает разные времена дня, погодные условия и уровни загрязнения панелей. Для расширения датасета также были использованы общедоступные изображения солнечных панелей с дефектами и без из онлайн-источников и научных баз данных после тщательной проверки и разметки. Каждое изображение было вручную размечено с помощью инструмента LabelImg. Были созданы два основных класса: изображения без видимых признаков деградации и изображения с видимыми признаками PID (затемненные области, обесцвечивание и т.п.). Датасет был разделен на обучающую, валидационную и тестовую выборки в соотношении 70:15:15 соответственно. Разделение проводилось стратифицированно для сохранения распределения классов в каждой выборке. Для улучшения качества данных и повышения обобщающей способности модели был применен комплекс методов предобработки и аугментации. Аугментация позволяет смоделировать различные условия съемки и значительно увеличивает эффективный размер обучающей выборки, снижая риск переобучения модели. Обучение проводилось на GPU NVIDIA GeForce RTX 3060 с использованием фреймворка TensorFlow 2.8. Обучение модели продолжалось 38

эпох до срабатывания callback'a ранней остановки. После обучения модель была протестирована на полностью изолированном тестовом наборе данных (335 изображений), который не использовался ни на одном из этапов обучения или валидации. Это дает объективную оценку способности модели к обобщению.

Анализ результатов позволил определить, что модель демонстрирует хорошую общую точность (82.1%), значительно превышающую эффективность традиционного визуального осмотра, который подвержен человеческой ошибке и усталости.

Заключение

По результатам работы был разработан и исследован метод автоматизированного оптического распознавания PID-деградации солнечных панелей на основе обучения сверточных нейронных сетей. В результате обучения и валидации была получена модель, продемонстрировавшая на изолированном тестовом наборе данных высокую общую точность для класса PID. Это свидетельствует о принципиальной возможности и эффективности использования CNN для оптической диагностики солнечных панелей. Разработанная модель может служить основой для создания программного обеспечения систем автоматического мониторинга и диагностики крупных солнечных электростанций. Это позволит перейти от планового и затратного ручного обследования к предиктивному обслуживанию, минимизируя простоя и потери генерации энергии.

Список использованных источников

1. Анализ видов деградации фотоэлектрических модулей и их вольт-амперных характеристик / Д. Ю. Широков, А. В. Пашенцев, А. С. Григорьев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2021. – № 38. – С. 5–20.
2. Разработка системы обнаружения дефектов солнечных панелей на основе алгоритма YOLO v5 / А. А. Белов, А. В. Моисеев, Д. С. Кренделев // Датчики и системы. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 34–44. – DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700814-202204-04>.
3. Analysis of YOLO Models for Solar Panel Defect Detection // 2025 5th International Conference on Power Electronics, Computing and Control (ICPECC). – 2025. – Р. 1-6. – DOI: 10.1109/ICPECA63937.2025.10928871.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Т25УЗБ-024).