

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЛАВУЧИХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN THE DESIGN AND OPERATION OF FLOATING SOLAR POWER STATIONS

**P. Shurkalov
A. Doroshin
N. Ivanov
D. Pereverzev
V. Kabanov**

Summary. This article explores current approaches and prospects for the utilization of artificial intelligence (AI) in the field of solar power generation, specifically focusing on floating solar power stations (FSPS). An analytical review is conducted, based on scientific articles, documents, and legislative acts, covering key technological and operational aspects of the stations, laying the foundation for understanding the necessity of AI integration. Methods and technologies aimed at enhancing efficiency and optimizing the operation of FSPS are examined. The results of AI application on the stations are presented, showcasing their practical value.

The authors contribute to the advancement of solar energy by providing a comprehensive overview of technological trends and practical solutions for using AI in FSPS. This article is relevant for both the scientific community, with interests in solar generation systems, and practitioners who can highlight contemporary trends and innovations. The content is presented in a simple and accessible language, making it engaging for a broad audience interested in achievements in the field of renewable energy and AI.

Keywords: artificial intelligence (AI), machine learning, floating solar power stations (FSPS), solar power stations (SPS), design of floating solar power stations (DFSPS).

Шуркалов Петр Сергеевич

к.т.н., Национальный Исследовательский Институт
Московский Энергетический Институт
ShurkalovPS@mpei.ru

Дорошин Александр Николаевич

к.т.н., Национальный Исследовательский Институт
Московский Энергетический Институт
DoroshinAN@mpei.ru

Иванов Никита Александрович

Аспирант, Национальный Исследовательский
Институт Московский Энергетический Институт
nikitaivanov838@gmail.com

Переверзев Данила Вадимович

Аспирант, Национальный Исследовательский
Институт Московский Энергетический Институт
danurwfw@gmail.com

Кабанов Валерий Алексеевич

Аспирант, Национальный Исследовательский
Институт Московский Энергетический Институт
kabanov.valerij2011@yandex.ru

Аннотация. Данная статья освещает актуальные подходы и перспективы использования искусственного интеллекта (ИИ) в области солнечной генерации, а именно на плавучих солнечных электростанциях (ПСЭС).

Проведен аналитический обзор, основанный на научных статьях, документах и законодательных актах, основных технологических и эксплуатационных аспектов станций, создавая фундамент для понимания необходимости внедрения ИИ. Рассмотрены методы и технологии, направленные на повышение эффективности и оптимизации работы ПСЭС. Представлены результаты применения ИИ на станциях, демонстрируя их практическую ценность. Авторы статьи вносят свой вклад в развитие солнечной энергетики, представляя комплексный обзор технологических трендов и практических решений использования ИИ для ПСЭС. Данная статья является актуальной, как для научного сообщества, интересы которого направлены в области применения систем солнечной генерации, так и для практиков, которые могут подчеркнуть для себя современные тенденции и инновации. Содержание статьи представлено простым и доступным языком, что делает ее интересной для широкой аудитории, интересующейся достижениями в области возобновляемой энергетики и ИИ.

Ключевые слова: искусственный интеллект (ИИ), машинное обучение, плавучие солнечные электростанции, СФЭС, СЭС, ПСЭС.

Введение

В густонаселенных районах земельные ресурсы очень дороги, и их использование для установки солнечных фотоэлектрических станций (СФЭС) делает проекты солнечных электростанций экономически

неэффективными. Одним из выходов из этой ситуации является установка СФЭС на водной поверхности водоемов.

Несмотря на значительный прогресс в исследованиях в области СФЭС, плавучие СФЭС по-прежнему требуют инженерного и научного анализа. Например, до сих

пор отсутствуют надежные математические модели для оценки эффективности плавучих СФЭС в конкретных метеорологических и динамических условиях, отличающихся от условий на суше.

В рамках решения данных вызовов, в последнее время привлекается внимание к применению искусственного интеллекта (ИИ) в контексте проектирования и эксплуатации плавучих солнечных электростанций. Использование методов машинного обучения и алгоритмов ИИ может значительно улучшить эффективность, прогнозируемость и управление плавучими СФЭС.

1. Общие положения

Термин «плавучие СФЭС» относится к любому типу фотоэлектрических систем, устанавливаемых в водоемах, таких как озера, водохранилища, плотины гидроэлектростанций, шахтные пруды, промышленные и ирригационные пруды, водоемы для очистки воды и прибрежные лагуны. Они имеют ряд преимуществ перед наземными СФЭС, таких как использование существующей инфраструктуры передачи электроэнергии (например, гидроэлектростанций (ГЭС)), близость к потребителям электроэнергии, увеличение выработки энергии за счет охлаждающего эффекта воды и снижение выбросов пыли. Полный масштаб влияния этих преимуществ на эффективность СФЭС еще не проверен для крупных электростанций в различных географических регионах, но во многих случаях преимущества могут перевесить возросшие капитальные затраты. [2]

Особый интерес представляет возможность добавления плавучих мощностей СФЭС к существующим гидроэлектростанциям, особенно в случае крупных ГЭС, которые могут работать в гибком режиме. Солнечная

генерация может быть использована для увеличения выработки энергии на таких станциях и поможет справиться с периодами низкой водной обеспеченности позволяя гидроэлектростанциям работать в режиме «пиковой», а не «базовой нагрузки». Это преимущество имеет место и в обратном направлении. Гидроэлектростанции могут работать в режиме «следования за нагрузкой» для сглаживания колебаний мощности СФЭС.

В большинстве случаев фотоэлектрические панели (ФЭП) обычно монтируются на плавучей конструкции на основе понтонов. Плавучие платформы ставятся на якорь и швартуются в определенном месте. Однако существуют плавучие СФЭС и других конструкций, к примеру, так называемая «плавучая СФЭС над водой», которая предусматривает собой установку ФЭП на сваях над мелководными водоемами. Схема конфигурации плавучей СФЭС, подключенной к ЭЭС, показан на рисунке 1.

Преимущества плавучих СЭС над наземными:

- *Экономия земельных ресурсов.* Плавучие СФЭС используют водные поверхности, которые не служат каким-либо экономическим, экологическим или рекреационным целям.
- *Уменьшенное испарение воды.* Испарение — значительная потеря водных ресурсов во всем мире, иногда достигающая 40 % [4, 5]. Покрытие части поверхности водоема плавающими СФЭС является эффективным способом снижения испарения из резервуаров с питьевой водой и ирригационных прудов и выработки чистой электроэнергии.
- *Интеграция в существующую электроэнергетическую инфраструктуру,* особенно возле гидроэлектростанций, может минимизировать длину высоковольтных линий электропередачи

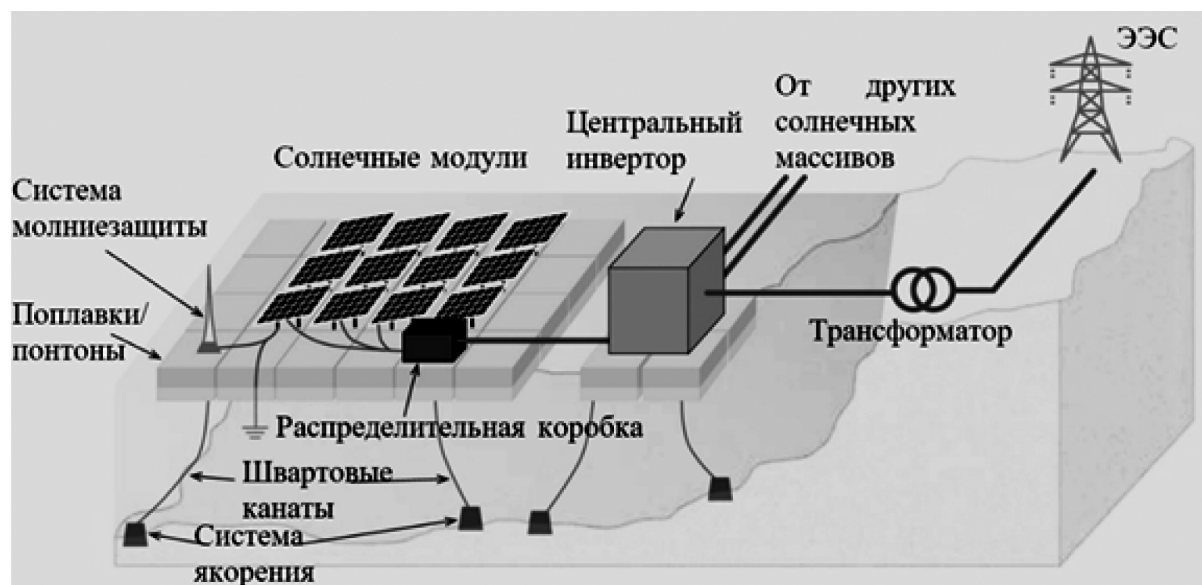


Рис. 1. Схема конфигурации ПСЭС [3]

— Упрощенная установка и развертывание. Плавающие СФЭС устанавливаются в водоемах и не требуют масштабной подготовки площадки, как наземные СФЭС

2. Применение ИИ в оптимизации работы ПСЭС

Исследования в области плавучих солнечных электростанций (ПСЭС) активно направлены на разработку ключевых компонентов инфраструктуры, таких как плавучие платформы, системы якорения и методы технического обслуживания [6]. Происходит работа над преодолением ограничений в установленной мощности и обеспечением устойчивости систем к воздействию водных условий. Примеры текущих исследований включают разработку материалов, способных справляться с агрессивной водной средой, и оптимизацию транспортировки через использование мобильного производства компонентов [7].

С одной стороны, исследования сосредотачиваются на увеличении производственных возможностей плавучих солнечных электростанций, а с другой стороны — на техническом обслуживании в водной среде с учетом специфики эксплуатации на воде.

Дополнительным аспектом в развитии плавучих солнечных электростанций является исследование и внедрение систем управления, использующих технологии ИИ. Алгоритмы машинного обучения и нейронные сети могут эффективно оптимизировать работу электростанции, адаптируя ее к изменяющимся условиям освещенности, изменениям в потреблении энергии или даже предсказывая и оптимизируя процессы технического обслуживания.

ИИ может давать интегрированное предложение на основе нечеткости, прототип которого учитывает экологические, особенно климатические условия, такие как различия в освещенности, ясности, температуре и влаж-

ности исследуемых регионов, чтобы дать иерархию их пригодности для строительства плавучей солнечной электростанции. Результаты были подтверждены путем внедрения дополнительных многокритериальных методов принятия решений (MCDM) [8].

Оптимизация расположения и ориентации панелей солнечных батарей является одним из ключевых аспектов работы плавучих солнечных электростанций. Это связано с тем, что правильное расположение и ориентация панелей позволяют максимально использовать солнечную энергию и минимизировать потери. Пример такой станции с использованием ИИ представлен на рисунке 2.

Была предложена система на основе ИИ, основанная на алгоритме оптимизации Grasshopper, позволяющая одновременно максимизировать выходную мощность гибридной гидроэлектростанции с ПСЭС, отношение объема накопленной воды к емкости резервуара и отношение подачи воды к спросу на воду. Результаты показали, что предложенная модель оптимизации может значительно улучшить синергетические преимущества взаимосвязи воды, продуктов питания и энергии, достигнув 13 %, 13,3 % и 15,1 % в хранении воды, производстве продуктов питания и выработке фотоэлектрической энергии на гибридных установках, соответственно. Оптимальные углы наклона плавучей фотоэлектрической установки будут варьироваться от $-11,9^\circ$ (летом) до $44,3^\circ$ (зимой) [11].

Автоматизированные системы технического обслуживания, поддерживаемые ИИ, включают в себя оптимизацию расписания обслуживания, прогнозирование затрат и определение оптимальных методов поддержания оборудования в рабочем состоянии. Это способствует сокращению времени простоя и обеспечивает бесперебойную работу станции.

В холодных регионах ИИ может сыграть роль в защите плавучих солнечных электростанций от обледенения



Рис. 2. Плавучая СФЭС с системой слежения за Солнцем, расположенная в водохранилище Хапчон, Республика Корея [9, 10]

водоемов. Вот несколько способов, как это может быть достигнуто:

- Прогноз погоды и оповещение: ИИ может анализировать данные о погоде, включая температуру и влажность воздуха, чтобы предсказать вероятность образования льда на воде. Он может также использовать данные о прогнозе для определения времени, когда вероятность обледенения будет наибольшей.
- Тепловые системы: Использование тепловых систем, в том числе электрических или подогреваемых элементов, может предотвращать обледенение. ИИ может управлять этими системами, включая их работу при необходимости в соответствии с прогнозами погоды. Это позволит поддерживать оптимальные условия работы солнечных панелей.

ИИ может автоматически обрабатывать новые данные о производстве энергии, вносить коррективы в модели, идентифицировать изменения в условиях эксплуатации и адаптировать свои стратегии оптимизации.

Эти аспекты ИИ в управлении плавучими солнечными электростанциями не только повышают эффективность их работы, но и делают их более адаптивными к переменным условиям окружающей среды

3. Примеры применения ИИ на ПСЭС

Международная команда ученых применила ИИ для повышения эффективности работы электростанций, преобразующих солнечную энергию в электрическую. Исследование проводилось на примере реальной электростанции, где были внедрены новые методы [12].

При разработке модели прогнозирования были использованы три метода ИИ на основе данных: адаптивная нейро-нечеткая система вывода данных (ANFIS), методология поверхности отклика (RSM) и искусственная нейронная сеть (ANN).

Результаты были получены на основе обработки трехлетних данных действующей солнечной фотоэлектрической станции мощностью 2 МВт в Кужалманнаме, штат Керала (Индия). Для определения наиболее точной прогнозной модели использовались статистические индексы, такие как коэффициент корреляции Пирсона (R), коэффициент детерминации (R^2), среднеквадратическая ошибка (RMSE), эффективность Нэша-Сатклиффа (NSCE), средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE), эффективность Клинга-Гупты (KGE), диаграмма Тейлора и матрица корреляции. Сравнительные исследования трех методов прогнозирования показали, что адаптивная нейро-нечеткая система вывода была самой точной моделью прогнозирования коэффициента производительности [13].

Стартапы постоянно разрабатывают инновационные способы сделать новые технологии более доступными и эффективными. Вот некоторые из ведущих стартапов в области ИИ.

3.1. Израильский стартап Xfloat

В середине 2022 года Израиль объявил о проекте по тестированию плавающего ИИ, который вырабатывает электроэнергию, отслеживая движение солнца. Система, разработанная израильским стартапом Xfloat, предназначена для перемещения и отслеживания солнца во время плавания по воде водохранилища.

Система Xfloat основана на возможностях машинного обучения. Компания создала интеллектуальную систему управления водоснабжением, которая контролирует подачу воды и насосы для точного наклона и отслеживания. Затем данные, собранные с датчиков, направляются в процесс машинного обучения на основе знаний, чтобы предсказать производительность фотоэлектрических систем и O&M (эксплуатацию и техническое обслуживание).



Рис. 3. Фотоэлектрические панели Xfloat [14]

Система Xfloat, показанная на рисунке 3, состоит из балластных танков, которые синхронно управляют вращением фотоэлектрических столов слежения. Система не использует моторы или гидравлику. Вместо использования передаточного механизма для наклона панелей используется гибкий гидростатический механизм позиционирования [14].

3.2. Стартап Suncast

В настоящее время Suncast предлагает услуги общей мощностью 1312 МВт, распределенные на 12 фотоэлектрических электростанциях.

Проекты Suncast:

1. Сервис прогнозирования солнечной энергии.

Используя платформу SaaS, рассчитываются прогнозы выработки электроэнергии для солнечных электро-

станций в формате графиков. Высокая точность достигается с помощью уникальных моделей ИИ комбинируя данные прогнозирования, предоставляемые спутниками, с фактическими данными о производстве энергии, чтобы соответствовать нормам каждого рынка и максимизировать производительность электростанций [14].

2. Сервис прогнозирования загрязнения.

ИИ и машинное обучение применяется для прогнозирования уровня загрязнения фотоэлектрических парков, позволяя заказчикам оптимизировать количество и точные даты очистки фотоэлектрических панелей, максимизируя прибыльность парков, достигаемую системой, которая выполняет прогнозирование погоды, позволяя планировать уборку, достигая экономии затрат на уборку более чем на 50 % [15].

Заключение

Применение искусственного интеллекта для плавучих солнечных электростанций является перспективным направлением исследований, обладающим большим по-

тенциалом для оптимизации работы системы. Эти технологии могут повысить эффективность электростанций, минимизировать потери энергии и обеспечить более точные прогнозы производства энергии. Дальнейшие исследования и разработки в этой области могут привести к созданию более эффективных и устойчивых систем генерации электроэнергии с использованием технологий искусственного интеллекта.

Амбиции в области возобновляемых источников энергии в рамках определяемых на национальном уровне взносов не только недостаточны, но и не соответствуют обязательствам стран во внутренней политике, которые существуют вне рамок Парижского соглашения (национальные законы, политика, дорожные карты, планы, стратегии). В соответствии с планом IRENA по повышению температуры на 1,5°C и обязательством COP28 утроить производство возобновляемой энергии во всем мире, мощности по производству возобновляемой энергии только в странах G20 должны вырасти с менее чем 3 тераватт (ТВт) в 2022 году до 9,4 ТВт к 2030 году, что составляет 80 % от общемирового объема.

ЛИТЕРАТУРА

1. IFC (International Finance Corporation). 2015. «Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants: A Project Developer's Guide». Working paper, International Finance Corporation, Washington, DC // URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/22797>.
2. Lee, N.; Grunwald, U.; Rosenlieb, E.; Mirletz, H.; Aznar, A.; Spencer, R.; Cox, S. Hybrid floating solar photovoltaics-hydropower systems: Benefits and global assessment of technical potential. *Renew. Energy* 2020, 162, 1415–1427.
3. Solar Energy Research Institute of Singapore (SERIS) at the National University of Singapore // URL: <https://www.seris.nus.edu.sg/>.
4. Helfer, F., C. Lemckert, and H. Zhang. 2012. «Impacts of Climate Change on Temperature and Evaporation from a Large Reservoir in Australia». *Journal of Hydrology* 475: 365–78.
5. Santafé, M.R., P.S.F. Gisbert, F.J.S. Romero, J.B.T. Soler, J.J.F. Gozávez, and C. M. F. Gisbert. 2014. «Implementation of a Photovoltaic Floating Cover for Irrigation Reservoirs». *Journal of Cleaner Production* 66: 568–70.
6. Choi Y.K. et al. A study on major design elements of tracking-type floating photovoltaic systems // *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. — 2014. — Т. 3. — №. 1. — С. 70–74.
7. Lee N. et al. Hybrid floating solar photovoltaics-hydropower systems: Benefits and global assessment of technical potential // *Renewable Energy*. — 2020. — Т. 162. — С. 1415–1427.
8. Ghose D., Pradhan S., Shabbiruddin. Floating solar plants—Exploring a new dimension of energy generation: A case study // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. — 2021. — С. 1–31.
9. Rosa-Clot, M. and G.M. Tina. 2018. Integration of water-based PV systems. In *Submerged and Floating Photovoltaic Systems* (chapter 9). Academic Press.
10. Patil, S.S., M.M. Wagh, and N.N. Shinde. 2017. «A Review on Floating Solar Photovoltaic Power Plants». *International Journal of Scientific & Engineering Research* 8(6).
11. Zhou Y. et al. An advanced complementary scheme of floating photovoltaic and hydropower generation flourishing water-food-energy nexus synergies // *Applied Energy*. — 2020. — Т. 275. — С. 115389.
12. Кирпичникова, И. Искусственный интеллект поможет улучшить работу солнечных электростанций. Южно-Уральский государственный университет // URL: <https://www.susu.ru/ru/news/2023/03/27/iskusstvennyy-intellekt-pomozhet-uluchshit-rabotu-solnechnyh-elektrostantsiy> (дата обращения 14.02.2024)
13. Gopi A. et al. Weather impact on solar farm performance: a comparative analysis of machine learning techniques // *Sustainability*. — 2022. — Т. 15. — №. 1. — С. 439.
14. S. Shemer, M. Kaplan-Zantopp (2022, 22 мая) Israel Tests AI-Powered Floating Solar Panels To Generate Clean Energy // URL: <https://nocamels.com/2022/05/xfloat-mekorot-solar-panels-energy-floating/> (дата обращения 14.02.2024)
15. Сайт компании Suncast // URL: <https://www.suncast.cl/?lang=en> (дата обращения 14.02.2024)