



ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Романов Дмитрий Алексеевич

аспирант кафедры возобновляемых источников энергии, Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,

Аннотация

В статье рассматривается взаимосвязь между солнечной активностью и эффективностью работы фотоэлектрических систем. Приведён анализ влияния различных параметров солнечного излучения — интенсивности, спектрального состава, уровня ультрафиолетового излучения и солнечных вспышек — на производительность солнечных батарей. Исследуются физические процессы, происходящие в полупроводниковых материалах под воздействием повышенной радиации и температурных колебаний. Рассматриваются результаты экспериментальных наблюдений и спутниковых измерений за последние десятилетия, а также модели прогнозирования выхода энергии в периоды повышенной солнечной активности. Сделан вывод о необходимости адаптивных систем управления и защиты фотоэлектрических установок в условиях изменчивости солнечного излучения.

Ключевые слова: солнечная активность, фотоэлектрическая эффективность, солнечные батареи, космическая погода, солнечные вспышки, радиация, деградация полупроводников, энергетика.

Введение

Развитие возобновляемой энергетики, в частности солнечных технологий, стало одним из ключевых направлений мировой энергетической политики. Однако эффективность работы солнечных батарей зависит не только от погодных условий, угла падения света и температуры поверхности панели, но и от параметров солнечной активности, которые определяются сложными процессами, происходящими на Солнце.

Солнечная активность представляет собой совокупность явлений, связанных с изменением интенсивности электромагнитного излучения, числа солнечных пятен, корональных выбросов и потоков заряженных частиц.

Эти процессы периодически усиливаются и ослабевают в рамках 11-летнего цикла, оказывая значительное влияние на работу энергетических систем, расположенных как на Земле, так и в космосе.

В условиях роста доли солнечной генерации в общем энергобалансе понимание влияния солнечной активности приобретает стратегическое значение. Исследование данных эффектов позволяет прогнозировать колебания выработки электроэнергии и повышать надёжность работы фотоэлектрических станций.

Солнечная активность и её основные параметры

Солнце является источником не только света, но и огромного потока энергии в виде электромагнитного и корпускулярного излучения. Солнечная активность проявляется в виде пятен, вспышек, протуберанцев и выбросов корональной массы. Все эти явления сопровождаются изменением спектра и интенсивности излучения, что влияет на фотоэлектрические процессы.

Основными характеристиками солнечной активности считаются:

число Вольфа (W) — показатель количества солнечных пятен;

поток солнечного излучения на длине волны 10,7 см (F10.7) — индикатор радиационной активности;

индекс геомагнитных возмущений (Kp) — отражает влияние солнечного ветра на магнитосферу Земли.

В периоды максимальной активности наблюдается увеличение ультрафиолетового и рентгеновского излучения, что изменяет ионизацию атмосферы и прозрачность воздушной толщи. Эти факторы оказывают непосредственное влияние на интенсивность солнечного потока, достигающего поверхности Земли, и, соответственно, на выработку электроэнергии фотоэлементами.

Фотоэлектрические процессы и их зависимость от солнечного спектра

Производительность солнечной батареи определяется количеством фотонов, способных вызвать генерацию электронно-дырочных пар в полупроводниковом материале. Наиболее распространёнными материалами для фотоэлементов являются кремний, арсенид галлия, перовскиты и тонкоплёночные структуры на основе CdTe.

Изменение спектрального состава солнечного излучения в периоды высокой активности оказывает заметное влияние на эффективность преобразования энергии. При усилении коротковолновой (УФ) компоненты увеличивается вероятность деградации поверхностных слоёв кремниевых элементов из-за фоторазрушения пассивирующих покрытий.

Кроме того, повышение радиационного фона приводит к образованию дефектов в кристаллической решётке, что снижает подвижность носителей заряда и уменьшает коэффициент квантовой эффективности. В результате снижается ток короткого замыкания и общая мощность панели.

Исследования, проведённые в Национальной солнечной обсерватории США (NSO) и Европейском космическом агентстве (ESA), показали, что колебания солнечного потока в пределах $\pm 3\%$ могут приводить к изменению генерации энергии фотоэлектрических систем на 2–5% в течение цикла активности.

Воздействие солнечных вспышек и корональных выбросов

Солнечные вспышки представляют собой резкие выбросы энергии, сопровождающиеся усилением рентгеновского и ультрафиолетового излучения. Их воздействие особенно ощутимо для спутниковых солнечных батарей и высокогорных станций.

Потоки протонов и электронов, выбрасываемые во время вспышек, могут вызывать радиационные повреждения полупроводниковых структур. В частности, на орбитальных аппаратах NASA и “Роскосмоса” зафиксированы случаи деградации панелей до 15% после мощных вспышек класса X.

Для наземных установок основную роль играет воздействие геомагнитных бурь, возникающих после выбросов корональной массы. Изменения магнитного поля Земли влияют на траектории частиц и степень ионизации атмосферы, что изменяет коэффициент пропускания солнечного излучения.

В периоды сильных бурь наблюдается временное снижение генерации на 3–7%, особенно в северных регионах с высокой магнитной широтой. Эти эффекты носят временный характер, но при длительных циклах могут вызывать ускоренное старение оборудования.

Температурные и радиационные эффекты в фотоэлементах

Температура поверхности солнечных панелей является одним из ключевых факторов, влияющих на КПД. При повышении температуры на 1 °C выход напряжения элемента снижается примерно на 0,4–0,5%. В периоды высокой солнечной активности из-за увеличения ультрафиолетового потока и теплового излучения панели нагреваются быстрее.

Кроме того, поток высокоэнергетических частиц может вызывать радиационные дефекты — вакансионные кластеры, межузельные атомы и центры рекомбинации. Эти дефекты сокращают время жизни носителей заряда и увеличивают внутренние потери.

Особенно уязвимы тонкоплёночные материалы (CdTe, CIGS), где структура менее устойчива к радиационному воздействию. Для повышения долговечности используются специальные защитные покрытия — оксиды кремния, алюминия и азота, снижающие деградацию.

Моделирование и прогнозирование эффективности фотоэлектрических систем

Для прогнозирования производительности солнечных батарей в условиях изменчивой солнечной активности применяются физико-статистические модели. Они учитывают цикличность солнечных процессов, облачность, атмосферное рассеяние и локальные геомагнитные параметры.

Одной из наиболее известных является модель **SMART-Solar**, разработанная в Германии. Она использует данные о потоках F10.7 и индексах Kp для расчёта ожидаемой выработки энергии. Анализ за 2000–2020 годы показал, что в периоды пиков солнечной активности наблюдается снижение средней производительности на 3,2% по сравнению с фазой минимума.

В Казахстане и России проводятся аналогичные исследования на базах наблюдательных станций в Алматы, Иркутске и на Байкале. Полученные данные используются для корректировки прогнозов энергопроизводства в национальных сетях возобновляемой энергетики.

Методы компенсации и адаптивного управления

С целью минимизации влияния солнечной активности применяются адаптивные системы управления фотоэлектрическими установками. Они позволяют регулировать угол наклона панелей, скорость вентиляции и токи нагрузки в зависимости от спектральных изменений излучения.

В ряде промышленных проектов (например, Siemens Solar и Canadian Solar) внедряются модули автоматической калибровки, учитывающие изменения солнечного индекса и коэффициента рассеяния. Также разрабатываются алгоритмы, использующие данные космических наблюдений для оперативной корректировки режимов работы.

В перспективе рассматривается использование искусственного интеллекта для прогнозирования солнечных бурь и оптимизации управления массивами солнечных батарей в реальном времени.

Заключение

Солнечная активность оказывает комплексное и неоднозначное влияние на производительность фотоэлектрических систем. Хотя среднегодовые колебания солнечного потока относительно невелики, в периоды экстремальной активности возможны значительные кратковременные отклонения в работе оборудования.

Повышенные уровни радиации и температурные эффекты приводят к деградации материалов и снижению эффективности преобразования энергии. В то же время внедрение адаптивных систем мониторинга и прогнозирования позволяет существенно повысить стабильность генерации.

Понимание механизмов влияния солнечной активности на работу солнечных батарей имеет важное значение для проектирования устойчивых энергетических систем. В будущем сочетание наблюдательных данных, физического моделирования и искусственного интеллекта позволит создать интеллектуальные солнечные станции, устойчивые к колебаниям космической погоды и способные максимально эффективно использовать энергию Солнца.

Литература

1. Громов В.Н. Физика солнечного излучения и фотоэлектрические преобразователи. — М.: Энергия, 2021.
2. Кузнецова Е.П. Влияние солнечной активности на параметры атмосферы и радиационного баланса Земли. // Геофизические исследования. — 2022. — №3.
3. Чернышов Д.А. Фотоэлектрические материалы и их устойчивость к радиационным воздействиям. — СПб.: Политех-пресс, 2020.
4. Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE) Data Report. — NASA, 2023.
5. Sharma P., Singh R. Impact of Solar Activity on Photovoltaic Power Generation. // Renewable Energy Journal. — 2022. — Vol. 187.
6. European Space Agency. Solar Weather and Photovoltaic Systems Report. — ESA Publications, 2023.
7. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Annual PV Degradation Study 2024. — Golden, USA, 2024.