

УДК: 621.365

Беркинов<sup>1</sup> Э.Х., к.т.н., доцент, Муродов<sup>1</sup> М., к.т.н., доцент,  
Павлович<sup>2</sup> И.А., Барайшук<sup>2</sup> С.М., к.ф.-м.н., доцент

<sup>1</sup>Наманганский государственный технический университет,  
Наманган, Узбекистан

<sup>2</sup>Белорусский государственный аграрный технический университет,  
г. Минск

## КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ПОТЕНЦИАЛ-ИНДУЦИРОВАННОЙ ДЕГРАДАЦИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Современная солнечная энергетика сталкивается с ключевой задачей обеспечения долговременной надежности и рентабельности фотоэлектрических систем. Одной из серьезных технических проблем, обуславливающих постепенное снижение производительности солнечных панелей, является потенциал-индуцированная деградация (Potential Induced Degradation, PID). Это явление возникает из-за разности электрических потенциалов между элементами модуля (например, фотоэлементами и заземленной алюминиевой рамой) и усугубляется под воздействием внешних факторов: высокой влажности, температурных колебаний и агрессивных сред [1].

Среднегодовая скорость деградации солнечных панелей, по данным исследований, составляет 0,6–0,7% [2], а в некоторых регионах и при неблагоприятных условиях может достигать 1,5–2% и выше. Это приводит к существенному снижению выработки электроэнергии в течение жизненного цикла станции. В связи с этим разработка эффективных и экономически целесообразных методов подавления ПИД является важной научно-практической задачей, направленной на повышение энергоэффективности и энергобезопасности за счет расширения использования возобновляемых источников энергии.

Основной причиной ПИД является возникновение паразитных токов утечки, приводящих к миграции заряженных частиц внутри структуры модуля. Под действием электрического поля положительные ионы, в частности ионы натрия ( $\text{Na}^+$ ) из защитного стекла, перемещаются к поверхности кремниевых фотоэлементов. Проникая в кристаллическую решетку и область р-п-перехода, ионы на-

трия создают шунтирующие пути, что приводит к снижению shunt-сопротивления, падению напряжения холостого хода и, как следствие, уменьшению максимальной мощности модуля [3].

В научной литературе выделяют два основных типа ПИД:

PID-s (шунтирующий тип): характеризуется резким снижением shunt-сопротивления и выходных параметров модуля из-за образования токов утечки.

PID-p (поляризационный тип): проявляется в увеличении поверхностной рекомбинации носителей заряда, что также ухудшает вольт-амперные характеристики.

Наиболее подвержена деградации задняя сторона модуля, что связано с конструктивными особенностями и механизмами воздействия окружающей среды. Диагностика ПИД осуществляется методами анализа вольт-амперных характеристик, электролюминесценции и термографии.

Существующие методы борьбы с ПИД можно разделить на три группы. Применение устойчивых материалов. Замена традиционного герметика – этиленвинилацетата (EVA) – на полиолефиновые эластомеры (POE) или термопластичные полиолефины (TPO) значительно снижает риск возникновения ПИД [4]. Преимуществом является долговечность и сохранение КПД, однако главный недостаток – невозможность применения для уже смонтированных систем и высокая стоимость. Использование восстановительных устройств (Anti-PID). Специальные устройства, подключаемые между панелями и инвертором, подают в ночное время обратное напряжение, частично восстанавливая параметры деградировавших модулей. Метод прост в интеграции, но не предотвращает ПИД, а лишь компенсирует его последствия, требуя дополнительных капиталовложений. Катодная защита (КЗ). Данный электрохимический метод, широко применяемый для защиты металлоконструкций от коррозии, заключается в смещении потенциала защищаемого объекта (рамы модуля) в отрицательную сторону. Это предотвращает миграцию положительных ионов натрия к фотоэлементам и нейтрализует токи утечки [5]. Нами рассматривается вариант протекторной защиты установки, когда рама модуля соединяется с магниевыми или цинковыми анодами, которые, корродируя, смещают потенциал рамы. Метод не требует внешнего питания, прост в монтаже, но его эффективность зависит от качества заземления и сни-

жается в засушливых условиях при высыхании грунта. Такой метод наиболее эффективен в сочетании с оптимизацией контура заземления. Для компенсации снижения эффективности в сухих грунтах предлагается использовать специальную грунтозамещающую смесь, патент на которую принадлежит соавторам исследования [6-7]. Данная смесь, размещаемая в околоэлектродном пространстве, оптимизирует электрофизические параметры грунта, обеспечивая стабильно низкое переходное сопротивление и сохраняя влажность, что необходимо для длительной и эффективной работы анодной защиты.

### **Заключение**

Потенциал-индуцированная деградация представляет серьезную угрозу для долговечности и экономической эффективности фотоэлектрических установок. Этот подход позволяет эффективно нейтрализовать разность потенциалов, вызывающую ПИД, и обеспечить стабильную работу системы защиты в различных климатических условиях, включая засушливые. Реализация данного метода на практике позволит значительно продлить срок службы как новых, так и уже эксплуатируемых солнечных электростанций, повысив их надежность и общую энергоотдачу. Работа поддержана грантом БРФФИ T25УЗБ-024.

### **Список использованных источников**

1. Pinge, S. Potential induced degradation of solar cells and panels / S. Pinge, O. Frank, M. Winkler [и др.] // Proceedings of 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. – 2010.
2. Jordan, D.C. Photovoltaic degradation rates – an analytical review / D.C. Jordan, S.R. Kurtz // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2013.
3. Naumann, V. Explanation of potential-induced degradation of the shunting type by Na decoration of stacking faults in Si solar cells / V. Naumann, D. Lausch, A. Hähnel [и др.] // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2014.
4. Sommeling, P.M. Corrosion effects in bifacial crystalline silicon PV modules; interactions between metallization and encapsulation / P.M. Sommeling, J. Liu, J.M. Kroon // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2023.
5. Электрохимическая защита: надежность, долговечность, инновации в предотвращении коррозии [Электронный ресурс] // Elektro-expo.ru. – 2024.
6. Pavlovich I.A., Baraishuk S.M. Reduction of the Electrical Resistance of Grounding Devices by the Use of a Soil Replacement Mixture Based on Graphite and Hydrogel to Stabilize the Electrophysical Parameters of the Soil.

ENERGETIKA. Proceed. of CIS higher edu. institutions and power engineering associations. 2023; 66(4): 322–332.

7. Baraishuk S. et al. The use of hydrogels in mixtures to reduce the transient resistance of the soil-grounding device //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2024. – Т. 497. – С. 03001.

**УДК 661.685+544.42**

**Василевич С.В., к.т.н., доцент, Юхневич С.Д.**  
*Белорусская государственная академия авиации,  
г. Минск*

## **ТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ГЕКСАФТОРСИЛИКАТА НАТРИЯ**

Гексафторсиликат натрия  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  является достаточно ценным продуктом, получению которого посвящены ряд исследований [1–4].  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  в настоящее время широко используется для производства кремния, используемого в различных отраслях народного хозяйства. Спрос на чистый кремний на мировом рынке возрастает в связи с ростом его потребления, например, солнечной энергетикой и электроникой.

В [5] приведено описание способа получения кремния – диссоциация  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  на  $\text{SiF}_4$  и  $\text{NaF}$  с последующим восстановлением  $\text{SiF}_4$  натрием. Описание способа и устройства для переработки гексафторсиликата натрия дано в [6]. Данное устройство предназначено для утилизации вторичных продуктов переработки апатита в процессе производства фосфорных удобрений, в частности гексафторсиликата натрия  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ , с получением тетрафторида кремния  $\text{SiF}_4$  и фторида натрия  $\text{NaF}$ .

Недостатками известных устройств для переработки гексафторсиликата натрия [6] является отсутствие процесса псевдооживления, что приводит к пассивации реакции по мере реагирования верхних слоев, содержащегося в устройстве гексафторсиликата натрия  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ , а также делает невозможным непрерывный процесс термического разложения гексафторсиликата натрия. Для устранения указанных недостатков может использоваться реактор с кипящим слоем, схема которого приведена на рисунке.