

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРТАТИВНЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

А.М. Рахматуллин (Компания Keysight Technologies)

Представлен состав солнечной фотогальванической системы, перечислены возможные неисправности. Показан диапазон измерительных инструментов компании Keysight, предназначенных для монтажа и обслуживания солнечных фотогальванических систем.

Ключевые слова: солнечная фотогальваническая система, солнечные панели, электроиспытания, качество электроэнергии, мониторинг.

Солнце — поистине неисчерпаемый источник возобновляемой энергии. Земля получает от Солнца около 4000 кВт·ч. Даже если использовать всего лишь 5% от этого объема, произведенного электричества будет достаточно, чтобы полностью покрыть мировую потребность в электроэнергии.

В настоящее время потребление солнечной энергии растет в геометрической прогрессии, и к 2050 г. солнечное излучение может превратиться в крупнейший мировой источник электроэнергии. В соответствии с планом разработки и внедрения новых технологий Международного энергетического агентства (IEA), к 2050 г. солнечные фотогальванические системы будут производить до 16% мирового объема электроэнергии, а объем термоэлектрической энергии, вырабатываемой на солнечных энергетических установках с концентраторами солнечного излучения, составит еще 11% [1].

Потенциал солнечной энергетики огромен, и компания Keysight способствует развитию этого потенциала с помощью широкого диапазона измерительных инструментов, предназначенных для монтажа и обслуживания солнечных фотогальванических систем (рис. 1).

Солнечная фотогальваническая система включает следующие компоненты:

- солнечные панели для сбора солнечной энергии;
- кабели и межсоединения для передачи энергии;
- контроллеры заряда и аккумуляторы для накопления энергии;
- солнечные инверторы для преобразования аккумулированной энергии в электрическую;
- интеллектуальные счетчики, трансформаторы и переключатели заземления для мониторинга и учета произведенной электроэнергии.

Организация, выполнившая монтаж системы, должна проводить регулярные проверки и мониторинг качества выработанной энергии. Это необходимо для обеспечения надежного встраивания солнечной фотогальванической системы в сеть энергоснабжения.



Рис. 1. Солнечные панели над автостоянкой компании Keysight Technologies (г. Санта-Роза, Калифорния)

### Солнечные панели: сбор солнечной энергии

Перед монтажом солнечной фотогальванической системы специалисты рассчитывают размеры солнечных модулей и батарей для достижения максимальной выходной мощности в рамках отведенного бюджета.

Точный расчет размеров солнечных модулей и батарей имеет особую важность для оптимальной эксплуатации в холодное и жаркое время года. Специалисты, монтирующие систему, должны убедиться, что напряжение модулей будет соответствовать стандартным нормативам и не превысит максимально допустимых значений для компонентов системы.

### Обнаружение неисправных фотогальванических элементов и панелей

Одним из наиболее эффективных методов обнаружения неисправных фотогальванических элементов и панелей является термический анализ. На солнечной электростанции, занимающей площадь более 8 Га, инженер не в состоянии проверить фотогальванические батареи модуль за модулем, отсоединяя и тестируя каждый модуль по очереди, но он может быстро получить ИК-изображение (термограмму) с помощью тепло-



Рис. 2. Тепловизор Keysight U5855A TrueIR

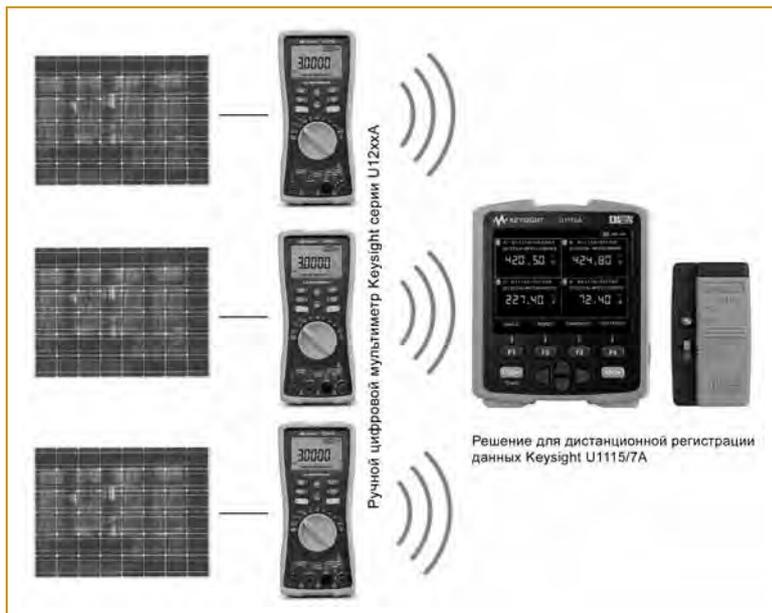


Рис. 3. Сравнение фотогальванических модулей

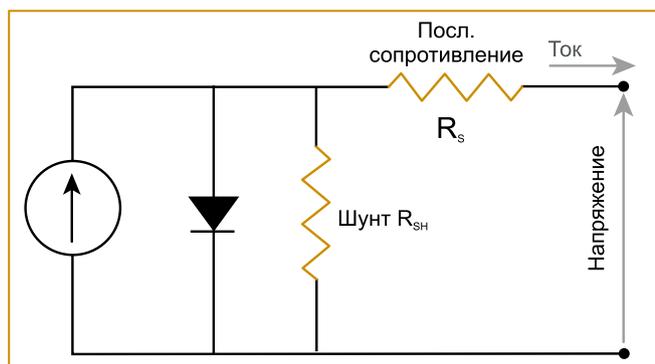


Рис. 4. Упрощенная модель солнечного элемента

визора Keysight U5855A TrueIR (рис. 2). Неисправные фотогальванические элементы обычно отображаются в виде пятен с повышенной температурой, поскольку они имеют низкий КПД, который в свою очередь приводит к накоплению тепловой энергии, которая не была переработана в электрическую. Одной из причин этого может являться износ электронных компонентов, например шунтирующих диодов солнечных панелей. Это приводит к снижению выходной мощности.

**Диагностика повреждений фотогальванических модулей**

Для проверки и диагностики повреждений отдельных модулей проектировщики и специалисты по монтажу солнечных фотогальванических систем могут использовать цифровые мультиметры с адаптерами Bluetooth. Соединение по беспроводной персональной сети позволяет одновременно сравнивать до четырех модулей (рис. 3). При одновременном измерении устраняются расхождения, связанные с колебаниями интенсивности излучения, тенями от дви-

жущихся облаков и прочими внешними воздействиями, способными повлиять на результат измерений напряжения модуля.

**Определение рабочих характеристик солнечных элементов и панелей**

Цепочка солнечных элементов, образующих солнечную панель, обычно ведет себя как источник тока в схеме с параллельно подключенным диодом, паразитным параллельным сопротивлением (шунтом) и последовательным сопротивлением (рис. 4). Вольт-амперная характеристика солнечного элемента представлена на рис. 5.

Важнейшие параметры солнечного элемента или солнечной панели, такие как сила тока короткого замыкания, плотность тока короткого замыкания, напряжение холостого хода, точка максимальной мощности и коэффициент преобразования [2], могут измеряться с помощью прецизионных параметрических анализаторов Keysight серии B2900A.

Режим свипирования по списку в таком анализаторе позволяет легко отобразить вольт-амперную характеристику солнечного элемента или панели в виде графика.

Одно из важных преимуществ режима свипирования по списку в прецизионном параметрическом анализаторе Keysight серии B2900A состоит в том, что этот режим позволяет устанавливать широкие интервалы в областях, где характеристики устройства стабильны, и узкие в областях, представляющих особый интерес, например в точке максимальной мощности фотогальванического элемента.

**Кабели и межсоединения: передача солнечной энергии**

Кабели и межсоединения в солнечных энергетических установках рассчитаны на длительное

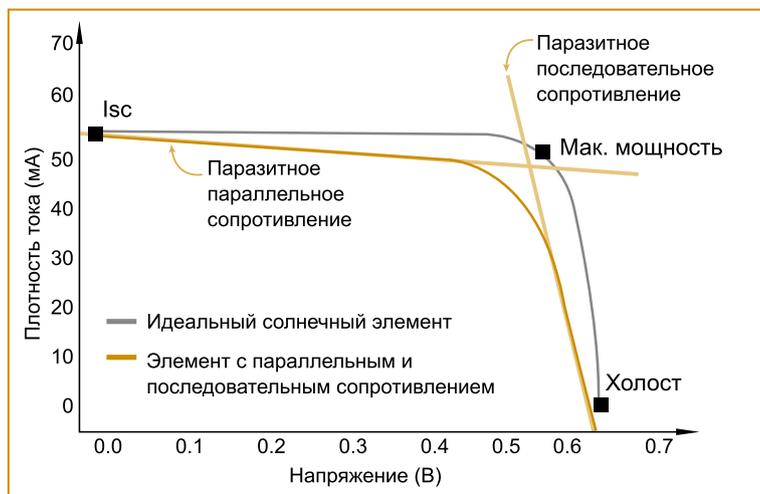


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика солнечного элемента

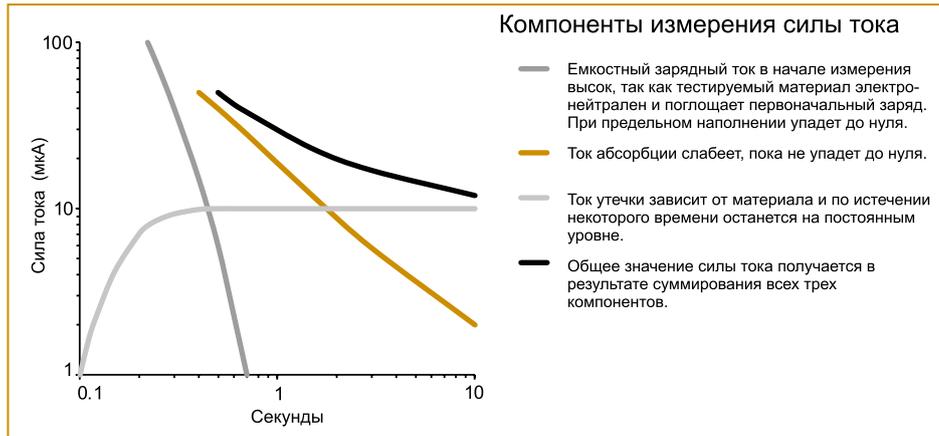


Рис. 6. График тока утечки в изолирующем материале с течением времени

воздействие ультрафиолетовых лучей, экстремальных температур (от мороза до сильной жары) и повышенной влажности. В фотогальванических системах используются стандартные межсоединения и диаметры кабелей.

При укладывании в желоба в процессе монтажа системы кабели и межсоединения подвергаются многократному скручиванию и изгибам, а также истиранию. Это может привести к нарушению изоляции. Поэтому, в соответствии со стандартом IEC 62446:2009, необходимо проводить электроиспытания для обеспечения нормального ввода в эксплуатацию и контроля безопасности. Испытания включают измерение сопротивления изоляции и проверку целостности заземления.

#### **Обнаружение поврежденных кабелей и межсоединений**

Поврежденные кабели и межсоединения склонны перегреваться. Тепловизор Keysight U5855A TrueIR — лучшее устройство для выявления точек повышенной температуры. Перегрев кабелей и межсоединений может указывать на ненадежное или поврежденное соединение.

#### **Проверка монтажа кабелей и межсоединений и выявление ухудшения рабочих характеристик**

В соответствии со стандартом IEC 62446:2009, измерение сопротивления изоляции является одним из важнейших тестов при проведении приемочных испытаний и проверке фотогальванических систем, подключенных к энергосети. Также очень важно регулярно проверять кабели и межсоединения на наличие повреждений, чтобы обеспечить бесперебойное и эффективное функционирование системы.

Ручные измерители сопротивления изоляции Keysight серий U1450A/60A (рис. 7) используются при проведении профилактического технического обслуживания и применяются для раннего обнаружения поврежденных кабелей и межсоединений. Напряже-



Рис. 7. Ручной измеритель сопротивления изоляции Keysight серии U1450A/60A (U1452A)

ние тестирования такого измерителя может составлять до 1000 В, а диапазон измерения сопротивления изоляции — до 260 ГОм.

Тестирование сопротивления изоляции выполняется путем пропускания через тестируемое оборудование постоянного тока под высоким напряжением, что приводит к протеканию небольшого тока по поверхности изолятора. Этот ток и измеряется. Полный ток состоит из трех компонентов: тока заряда емкости, тока абсорбции и тока утечки (рис. 6). Ток утечки определяется материалом и является постоянной величиной, не зависящей от времени.

#### **Контроллеры заряда и аккумуляторы: накопление солнечной энергии**

Контроллеры заряда и аккумуляторы, разрабатываемые специально для солнечных энергетических установок, отличаются от стандартных. Например, у аккумулятора солнечной установки обычно есть возможность «глубокой зарядки», и поэтому в ходе эксплуатации он может расходовать большую часть своей емкости (до 80%). Срок эксплуатации аккумуляторной батареи зависит от того, как она заряжалась, обслуживалась и хранилась (соблюдались ли температурные условия), а также от других факторов. В солнечных установках используются контроллеры заряда с отслеживанием точки максимальной мощности и программным обеспечением, позволяющим динамически согласовывать фотогальваническое напряжение с напряжением аккумуляторной батареи и максимизировать ее заряд.

#### **Проверка, мониторинг и тестирование аккумулятора**

Аккумуляторы позволяют получать электроэнергию в периоды отсутствия солнечного света. Обычная программа эксплуатации аккумуляторной батареи включает контрольно-измерительные мероприятия, связанные с физическим обслуживанием и электрообслуживанием.

В рамках физического обслуживания аккумуляторных батарей проводятся следующие контрольно-измерительные мероприятия:

- визуальный осмотр батарей для выявления протечек, коррозии, деформаций, обесцвечивания пластин аккумуляторов и проверки уровня электролита;
- динамические проверки целостности обмотки соединителя;

*Ложные друзья, подобно тени, следуют за нами по пятам, пока мы ходим на солнце, и тотчас же покидают нас, как только мы вступаем в тень.*

П. Бови



Рис. 8. Инструменты компании Keysight для тестирования солнечного контроллера заряда: (1) ручной цифровой мультиметр Keysight серии U12xxA; (2) токоизмерительные клещи Keysight серий U119xA и U121xA; (3) анализатор мощности Keysight IntegraVision PA2201A

- проверки температуры окружающей среды и в некоторых случаях температуры;
- аккумулятора.

В рамках электрообслуживания аккумуляторных батарей проводятся следующие контрольно-измерительные мероприятия:

- изолирование блока аккумуляторов от солнечного инвертора;
- изолирование отдельного аккумулятора;
- измерение напряжения на выводах аккумуляторной батареи (без нагрузки);
- измерение напряжения с нагрузкой 100 А;
- запись и анализ данных каждой батареи для выявления необходимости в профилактическом обслуживании.

#### **Тестирование солнечного контроллера заряда**

В солнечных контроллерах заряда используются встроенные устройства отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ) для более эффективной зарядки аккумуляторов от источников солнечной энергии.

Тестирование устройства ОТММ включает следующие проверки (рис. 8).

1. Электрический КПД устройства ОТММ. Тест выполняется путем сравнения выходной/входной мощности с использованием анализатора мощности IntegraVision PA2201A компании Keysight.

2. Эффективность отслеживания устройства ОТММ. Тест выполняется путем мониторинга мощности, требуемой для ОТММ, и ее сравнения с мощностью солнечного модуля, которая динамически изменяется из-за изменений интенсивности солнечного излучения. Для анализа проблем при монтаже системы и для оценки эффективности устройств ОТММ успешно используются ручные цифровые мультиметры

Keysight серии U12xxA и токоизмерительные клещи Keysight серий U119xA или U121xA.

Оба теста включены в стандарт DIN EN 50530 «Общий КПД фотогальванических инверторов, подключенных к энергосети».

#### **Солнечный инвертор: преобразование солнечной энергии**

Основная задача инвертора заключается в преобразовании постоянного электрического тока, производимого солнечными панелями, в переменный ток. Качество и КПД солнечных инверторов, преобразующих постоянный ток в переменный, важны при монтаже солнечной фотогальванической системы. Как однофазный, так и трехфазный инвертор должен выдавать высококачественный выходной сигнал, пригодный для питания местной энергосети или для домашнего потребления.

Низкое качество выходного сигнала солнечного инвертора может привести к следующим проблемам:

- присутствие в синусоидальном выходном сигнале переменного тока гармонических искажений приведет к дополнительной нагрузке на сеть электропитания и понизит эффективность всей системы;
- неравномерность нагрузки, приводящая к дополнительной асимметрии напряжений, повлияет на другие нагрузки в этой же энергосети;
- быстрые колебания напряжения приводят к мерцанию света.

Плохое качество сигнала может привести к неожиданным отключениям питания, неисправностям и перегреву оборудования (приводящему к сокращению срока эксплуатации), возникновению помех при электронной связи и т. п.

#### **Измерение качества электроэнергии, вырабатываемой солнечным инвертором**

Важнейшая измеряемая характеристика солнечного инвертора — это КПД преобразования постоянного тока в переменный. Ее можно определить с помощью анализатора мощности Keysight IntegraVision серии PA2200. Обычно производители указывают значения максимального КПД, но средневзвешенные величины, определяемые в соответствии со стандартами СЕС и Европейского союза, более точно отражают фактический КПД для данного варианта использования. Анализатор мощности Keysight IntegraVision серии PA2200 способен определять важнейшие параметры качества сигнала, в том числе активную и полную мощность переменного тока, реактивную мощность, коэффициент электрической мощности, фазовый угол и коэффициент амплитуды напряжения и силы

тока. Также он измеряет гармонические колебания напряжения, силы тока и мощности до 250-го порядка

Если невозможно использовать настольные инструменты, компания Keysight предлагает целый ряд ручных приборов, например, ручные цифровые мультиметры серий U12xxA и токоизмерительные клещи серий U119xA.

#### **Мониторинг работы солнечного инвертора и выявление неполадок**

Первым признаком неисправности обычно является перегрев. А самый эффективный способ выявить превышение диапазона рабочих температур — это использование тепловизора. Тепловизор Keysight U5855A TrueIR позволяет выполнить быстрое сканирование солнечного инвертора для проверки его нормального функционирования.

#### **Интеллектуальные счетчики, трансформаторы и переключатели заземления: мониторинг и учет произведенной электроэнергии**

При проведении периодической проверки технического состояния солнечной фотогальванической системы важно убедиться в целостности соединений

и обмоток трансформаторов. Также необходимо проверить интеллектуальные счетчики и переключатели заземления. Любое повреждение этих компонентов может вывести из строя солнечную фотогальваническую систему и повлечь за собой трудоемкий процесс устранения неисправностей. Более того, это может привести к возникновению опасной ситуации для технического персонала. Обычно об угрозе возникновения неисправности свидетельствует чрезмерный перегрев.

В этой ситуации удобнее и безопаснее всего воспользоваться тепловизором, например, моделью Keysight U5855A TrueIR, и получить ИК-изображения находящихся под напряжением трансформаторов и соединений.

#### **Список литературы**

1. Лукас Меруан. Солнце станет главным источником электроэнергии к 2050 г. // Computerworld. 2014. №10. <http://www.osp.ru/news/articles/2014/39/13043340>.
2. Ларионов В.Р., Малевский Д.А., Покровский П.В., Румянцев В.Д. Измерительные комплексы для исследований солнечных фотоэлектрических преобразователей каскадного типа и концентраторных модулей на их основе // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. Вып. 6.

*Рахматуллин Артур Марсович — инженер компании Keysight Technologies.  
Контактный телефон 8 (800) 500-92-86.  
[Http://www.keysight.ru](http://www.keysight.ru)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ СТАНЦИИ В УСЛОВИЯХ ТУРКМЕНИСТАНА**

**А.Я. Джумаев (Государственный энергетический институт Туркменистана),  
Э.Д. Кадыров (ООО «ПСК «ИнжПром»)**

*На основе проведенных исследований эксплуатационных параметров фотоэлектрической солнечной станции мощностью 2 кВт, построенной в Государственном энергетическом институте Туркменистана, получены зависимости энергетических параметров станции в течение солнечного дня в разные времена года в различных погодных условиях. Определены оптимальные режимы работы станции и ожидаемый объем выработки электроэнергии солнечной станцией.*

*Ключевые слова: фотоэлектрическая солнечная станция, солнечная станция в условиях Туркменистана, эффективность.*

Развитие солнечной энергетики предполагает решение как фундаментальных научных проблем, так и прикладных задач. К этим задачам относятся, в частности, определение ресурсов возобновляемых источников энергии, создание методов расчета доступных потоков солнечной энергии и оптимальных режимов работы фотоэлектрических солнечных станций в различных условиях эксплуатации.

В работе [1] для оценки обеспеченности территории Туркменистана ресурсами солнечной энергии был проведен анализ статистических характеристик суточных сумм суммарной солнечной радиации. Появившиеся в последние годы новые источники метеорологической информации, основанные, в том числе на многолетних спутниковых наблюдениях за поверхностью земного шара, представляют более детальные актинометрические и метеорологические данные. В частности, значительно расширяет возможность

оценки ресурсов солнечной энергии открытый доступ к базе данных Национального агентства по аэронавтике и исследованию космического пространства США NASA SSE (NASA Surface meteorology and Solar Energy) (<http://wrdc.mgo.rssi.ru/>, <http://eosweb.lars.nasa.gov/sse/>).

В качестве технического потенциала солнечной энергии территории будем рассматривать в первом варианте расчета удельную выработку электрической энергии одним фотоэлектрическим преобразователем (ФЭП) заданной площади, работающим на сеть. Это наиболее простая оценка, поскольку не предусматривает использование дополнительных устройств аккумуляции электрической энергии, что необходимо при сооружении автономных систем электроснабжения. В этом случае технический потенциал солнечной энергии будет отличаться от природного уровня удельной инсоляции на величину, определяемую ко-