

Количество ежегодно поступающей на поверхность Земли солнечной энергии, составляющее  $1,05 \cdot 10^{18}$  кВт·ч, настолько велико, что, по расчетам ученых, даже при использовании всего лишь 0,125% этой энергии можно было бы полностью обеспечить сегодняшние потребности в энергии всей нашей планеты.

## Солнечные фотоэлектрические электростанции

Адольф Кравченко доктор техн. наук, профессор, Дмитрий Любас



В настоящее время солнечная энергия незначительно используется для выработки электроэнергии – ее вклад в общемировую выработку электроэнергии не превышает 0,1%, а среди возобновляемых источников энергии (ВИЭ) ей принадлежит всего лишь около 1%. Однако, несмотря на скромные успехи в крупномасштабной выработке электричества из солнечной энергии, темпы прироста мощностей на солнечных электростанциях (СЭС) за последние 14 лет являются очень высокими: мощность фотоэлектрических электростанций (ФЭС) за период с 1996 по 2010 год увеличилась более чем в 57 раз (с 0,7 до 40 ГВт) (рис.1) и продолжает быстро расти, увеличившись за один лишь год (с конца 2010 г. по начало 2012 г.) с 40 до 70 ГВт.

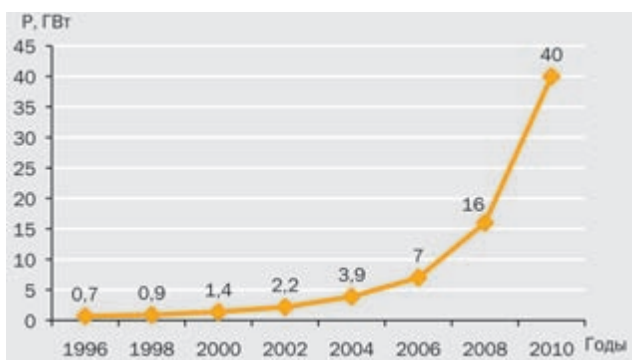


Рис.1

В данной статье рассмотрен недостаточно освещенный в литературе комплекс вопросов, раскрывающих особенности выработки электроэнергии на ФЭС, а также кратко охарактеризованы применяемые на них солнечные панели и другое электрооборудование.

### Преобразование солнечной энергии в электрическую на ФЭС

Упрощенная структурная схема простейшей автономной ФЭС мощностью 0,01...100 кВт (обычно называемой ФЭС первого типа), предназначенной для электроснабжения передвижных объектов или объектов, удаленных от ЛЭП, показана на рис.2.

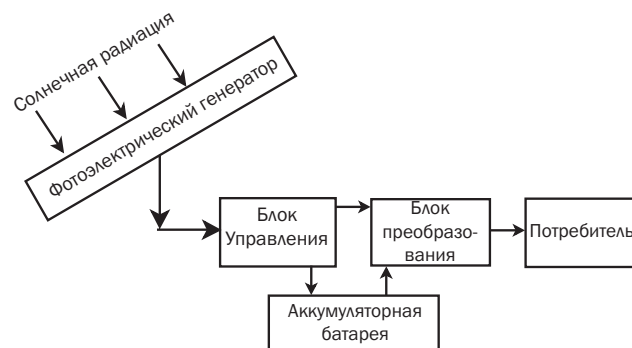


Рис.2

Отличительной особенностью автономной ФЭС является то, что, благодаря наличию в ее составе блоков управления, преобразования и аккумуляторной батареи, она может работать не только в дневное время от солнечного света, но и ночью от аккумуляторной батареи, которая, заряжаясь от фотоэлектрического генератора, запасает энергию и делает ее доступной в любое время. Кроме того, в случае необходимости пользоваться обычными приборами переменного тока, в состав показанной на рис.2 схемы ФЭС между аккумуляторной батареей и нагрузкой потребителя вместо блока преобразования используется блок регулирования – инвертор, преобразующий постоянный ток в переменный.

Функциональная схема ФЭС второго типа (ФЭС, соединенной с промышленной электросетью) показана на рис.3, где обозначено:

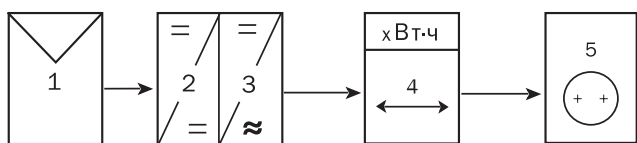


Рис.3

- 1 – фотоэлектрический генератор;
- 2 – устройство отбора максимальной мощности;
- 3 – инвертор;
- 4 – двунаправленный электросчетчик;
- 5 – централизованная электросеть.

### Основные компоненты фотоэлектрических солнечных электростанций

Основными компонентами ФЭС являются солнечные модули (солнечные панели), инвертор, преобразующий постоянный ток в переменный, аккумуляторные батареи, регуляторы отбора максимальной мощности, а также другое электрооборудование [1, 2]. Охарактеризуем более подробно особенности используемых на ФЭС солнечных панелей, работу инвертора и регуляторов отбора максимальной мощности.

#### Солнечные панели

Солнечные панели, преобразующие часть солнечного излучения в постоянный электрический ток, являются основной частью любой ФЭС. Каждая такая панель состоит из полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), осуществляющих прямое, одноступенчатое преобразование солнечного света в электричество, осуществляемое с помощью фотоэлементов, которые вырабатывают постоянный электрический ток. Соединяя фотоэлементы в модули (панели), а модули друг с другом, строят крупные ФЭС.

Фотоэлементы для панелей ФЭС изготавливают из полупроводникового кремния, легированного некоторым количеством мышьяка и бора. В настоящее время наибольшее распространение получили три вида солнечных панелей:

- монокристаллические;
- тонкопленочные;
- поликристаллические.

*Монокристаллические панели* на основе монокристаллического кремния имеют наивысшую эффективность преобразования энергии: их КПД, составляющий 17...18%, самый большой, а срок их службы – не менее 25 лет. Основной материал конструкции таких панелей – чистый кремний в виде монокристаллов, получаемых выращиванием их на семена, которое медленно вытягивается из кремниевого расплава. Стержни, полученные таким путем, разрезают на части толщиной 0,2...0,4 мкм, а на получаемые таким образом элементы, после их обтачивания, шлифовки и очистки, накладывают защитное покрытие. Затем кристалл проходит процесс металлизации, а также покрывается антирефлексионным защитным слоем. На конечной стадии изготовления кристаллы соединяются, образуя ячейки, оптимальное число которых в монокристаллических батареях – 36. Полученную пластину обрамляют в алюминиевую раму, облегчающую

ее крепление к несущей конструкции. Мощность отдельной солнечной панели может достигать 10...260 Вт. Диапазон рабочих температур для получения оптимальной мощности данного вида солнечных панелей колеблется в пределах 15...25°C, причем максимальная мощность достигается только при ясном небе, средней температуре воздуха 25°C и направлении панелей прямо на Солнце. При наличии даже небольшой облачности их мощность снижается на 70%, а в случае сильной облачности – на 90%. Поэтому, чтобы на практике обеспечить максимальную мощность монокристаллических панелей, их необходимо устанавливать в местах с большим числом солнечных дней в году и применять автоматические системы слежения за направлением на Солнце.

*Поликристаллические солнечные панели*, эффективность которых не так сильно зависит от угла падения солнечных лучей и которые имеют срок службы не менее 20 лет, являются альтернативой монокристаллическим панелям.

При производстве таких панелей отсутствует операция вытягивания, благодаря чему их производство становится менее энергоемким и обходится намного дешевле. Однако из-за образования внутри кристалла поликристаллического кремния областей, отделенных зернистыми границами, вызывающими меньшую эффективность элементов, КПД солнечных панелей на основе поликристаллического кремния составляет лишь 10...12%.

*Тонкопленочные панели* – наиболее дешевый вариант из всех видов солнечных панелей, обеспечивающий минимальную себестоимость их производства. Такие панели успешно работают при рассеянном излучении, не требуют прямых солнечных лучей, и их суммарная вырабатываемая за год мощность обычно на 10...15% превышает показатели традиционных кристаллических солнечных панелей. Благодаря такому свойству применение тонкой пленки является намного более рентабельным способом выработки электроэнергии по сравнению с другими способами ее выработки. Поэтому такие панели преимущественно (на 95%) используются для ФЭС, генерирующих электроэнергию непосредственно в сеть, даже несмотря на то, что для установки тонкопленочных панелей требуется приблизительно в 2,5 раза больше площади, чем для панелей с монокристаллическими батареями.

Отметим, что тонкопленочные панели из-за меньшего КПД наиболее эффективно использовать в системах мощностью от 10 кВт, а монокристаллические и поликристаллические – для построения небольших автономных или резервных систем электроснабжения.

Для получения необходимой мощности и рабочего напряжения солнечные панели соединяют последовательно или параллельно, получая таким образом фотоэлектрический генератор, мощность которого всегда оказывается меньше, чем сумма мощностей отдельных панелей из-за потерь на рассогласование. Для снижения этих потерь необходим тщательный подбор в генераторе панелей с минимальным разбросом характеристик. Так, например, при последовательном соединении 10 панелей с разбросом характеристик в 10% потери на рассогласование составляют около 6%, а при разбросе в 5% они уменьшаются до 2%.

При затенении одной панели или ее части в фотоэлектрическом генераторе при последовательном соединении отдельных панелей возникает, так называемый, «эффект

горячего пятна» – затененная панель или часть ее начинает рассеивать всю мощность, вырабатываемую освещенными панелями (или ее частями), быстро нагревается и выходит из строя. Поэтому для устранения этого эффекта параллельно с каждой панелью (или ее частью) устанавливают шунтирующий диод. К каждой линейке последовательно соединенных панелей подключается также блокирующий диод – для выравнивания напряжений линеек. Схема фотоэлектрического генератора с подключенными параллельно с каждой его панелью диодами показана на **рис.4**.

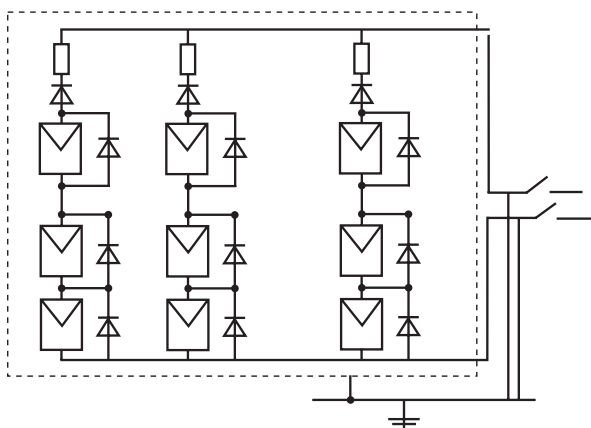


Рис.4

Солнечные панели, применяемые для автономных ФЭС, обычно устанавливают на крыше или на фасаде здания, и они одновременно являются своеобразным кровельным или защитным материалом, а панели, обслуживающие промышленные ФЭС, устанавливают на стальных или алюминиевых опорных конструкциях непосредственно на земле, как это показано на **фото**, помещенном в начале статьи, на котором показаны солнечные панели построенной в Крыму в 2011 г. самой крупной в мире ФЭС «Перово» мощностью 100 МВт.

*Вольтамперная характеристика и регулирование отбора максимальной мощности*

Кроме КПД, основными параметрами каждой солнечной панели являются также величины, определяющие ее вольт-амперную характеристику (далее – ВАХ), такие как:

- ток КЗ ( $I_{кз}$ );
- напряжение «холостого хода» ( $U_{хх}$ );
- температурный коэффициент изменения величин  $I_{кз}$  и  $U_{хх}$ .

Электрические параметры солнечной панели представляются в виде ВАХ, снятой при стандартных условиях (*Standard Test Condition – STC*), т.е. когда мощность солнечной радиации составляет  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , температура элементов –  $25^\circ\text{C}$  и солнечный спектр – на широте  $45^\circ$  (**рис.5**).

На **рис.5** обозначено:

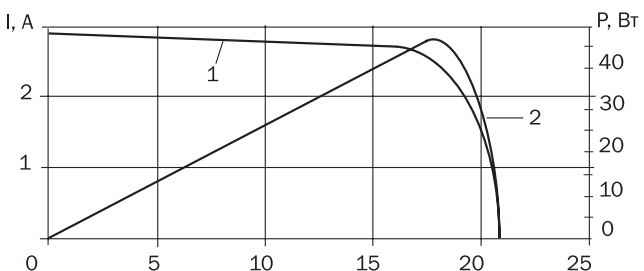


Рис.5

- 1 – ВАХ, снятая при стандартных условиях;
- 2 – кривая мощности, отбираемой от солнечного модуля в зависимости от напряжения и нагрузки.

Мгновенная выходная мощность солнечной панели, равная произведению мгновенных значений тока и напряжения, представляется на ВАХ в виде площади, ограниченной осями координат и прямыми, соответствующими мгновенным значениям тока и напряжения. Зная параметры ВАХ, можно найти на этой характеристике такую точку (ее называют точкой МРР, англ. сокращение от *maximum power point* – точка максимальной мощности), при которой эта площадь, а следовательно, и выходная мощность будут максимальными. При этом соответствующие этой точке ток  $I_{mpp}$  и напряжение  $U_{mpp}$  (**рис.6**) обычно называют рабочим током и рабочим напряжением соответственно. Для достижения режима максимальной мощности достаточно отрегулировать сопротивление нагрузки солнечной панели так, чтобы оно было равно отношению  $U_{mpp}/I_{mpp}$ .

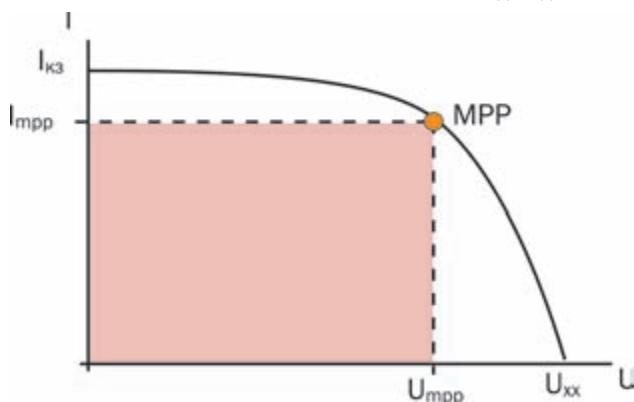


Рис.6

Значение напряжения  $U_{mpp}$  для солнечной панели, состоящей из 36 фотоэлементов, будет около 16...17 В (0,45...0,47 В на фотоэлемент) при  $25^\circ\text{C}$ . Такой запас по напряжению необходим для того, чтобы компенсировать снижение рабочего напряжения при нагреве панели излучением: температурный коэффициент напряжения ХХ для кремния около  $-0,4\%/градус$ , а для тока – положительный и составляет  $0,07\%/градус$ . Отметим, что напряжение  $U_{хх}$  солнечной панели мало изменяется с изменением освещенности, в то время как ток  $I_{кз}$  прямо пропорционален освещенности. КПД солнечной панели определяется как отношение максимальной мощности к общей мощности излучения, падающей на поверхность панели при STC, и составляет 11...15%.

Отметим, что ВАХ фотоэлектрического генератора имеет такой же вид, как и ВАХ единичной панели, поэтому рабочая точка генератора, подключенного к нагрузке, не всегда совпадает с точкой максимальной мощности, положение которой зависит от таких факторов, как условия освещенности и температура окружающей среды. Подключение таких нагрузок, как, например, электродвигатель, может сдвинуть рабочую точку системы в область минимальной или даже нулевой мощности, и двигатель просто не запустится. Поэтому важным компонентом ФЭС являются преобразователи напряжения, способные согласовывать солнечную панель с нагрузкой.

*Инверторы*

Инверторы представляют собой полупроводниковые приборы, преобразующие постоянный электрический ток,



вырабатываемый солнечными панелями, в переменный. Они подразделяются на два типа в соответствии с типом ФЭС:

- инверторы для автономных ФЭС;
- инверторы для сетевого использования на ФЭС.

Оба типа инверторов отличаются между собой схемами управления: первый тип инверторов имеет генератор частоты, а во втором в качестве генератора частоты используется сама сеть (поскольку он должен работать синхронно с промышленной электросетью). Требования к форме выходного сигнала для разных типов инверторов различны – для автономных обычно достаточна даже трапециевидная форма выходного сигнала, а для сетевых инверторов форма выходного сигнала должна быть строго синусоидальной.

### Солнечные электростанции в пустыне Сахара

СЭС в пустынных местностях построены уже давно, например в Неваде. Однако ни в какое сравнение с этими СЭС не идет предложенный в 2009 г. профессором Хидеюми Коинума из Токийского университета экзотический «проект разведения солнечной энергетики в Сахаре», заключающийся в «размножении» СЭС в пустыне Сахара [3].

Основной принцип этого исследовательского проекта довольно прост: солнечные батареи за счет вырабатываемой ими энергии должны обеспечить основу для своей дальнейшей экспансии. При этом вместо того, чтобы доставлять многие тысячи тонн солнечных панелей в пустыню Сахару, предлагается производить их на месте, на краю пустыни, используя для их производства чистый кремний, извлекаемый из песка пустыни. После того как мощность одного такого участка пустыни достигнет определенной величины, где-то неподалеку можно будет построить второй завод по переработке песка и завод по выпуску солнечных панелей, используя для его строительства энергию, вырабатываемую ранее построенной ФЭС. Второй завод, выпустив достаточное количество солнечных панелей, позволит построить поодаль третий завод по переработке песка и т.д. Так ФЭС начнут «размножаться» по экспоненте, как это показано на **рис.7**.

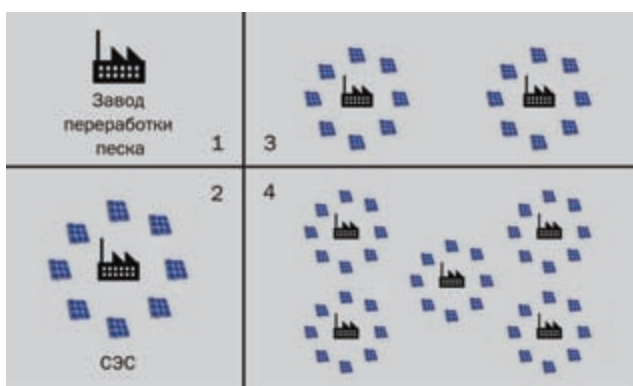


Рис.7

Поскольку на постройку заводов будет уходить небольшая доля общей мощности СЭС, то получаемую солнечную энергию надо будет переправлять крупным потребителям в Европу, возможно, и дальше, а другую ее часть использовать для опреснения воды, необходимой для отвоения территории у пустыни (**рис.8**). И тогда, по заключению японских экспертов, невозможно будет обойтись без кабелей из

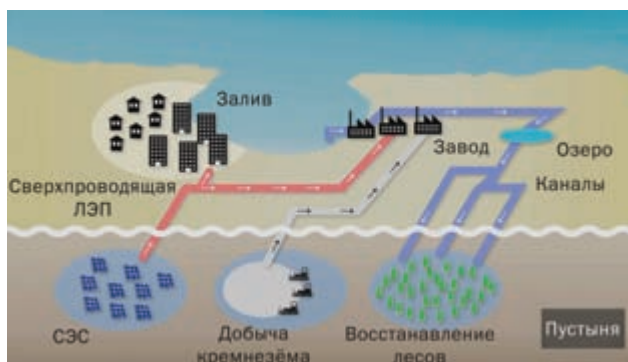


Рис.8

высокотемпературных сверхпроводников, которые будут прокладываться под землей – для минимизации перепадов температуры грунта и охлаждаться жидким азотом.

Отметим, что хотя промышленная технология изготовления кабелей из высокотемпературных сверхпроводников уже существует, однако при крупномасштабном их применении возникает большое количество еще нерешенных проблем. Так, например, до сих пор еще не выяснено, как оптимальным образом прокладывать такие кабели в пустыне, и на огромные расстояния, какими будут затраты на работу охлаждающего оборудования и др.

Исследовательский проект профессора Х. Коинума за последние два года получил некоторое развитие, выразившееся в том, что два японских агентства — по наукам и технологиям (JST) и по международному сотрудничеству (JICA) объединили под своей эгидой специалистов из шести японских университетов и институтов, а также из алжирского научно-технологического университета Орана (USTO) и весной 2010 г. создали в Африке исследовательский центр по солнечной энергии (*Sahara Solar Energy Research Center – SSERC*). Задача этого центра – разработка и испытание новых технологий, необходимых для того, чтобы Solar Breeder мог стать реальностью. Авторы проекта планируют построить опытную установку по переработке песка, способную выдавать тонну чистого кремния в год. Кроме того, в 2011 г. начато строительство в Сахаре «своей» солнечной установки мощностью 100 кВт с тем, чтобы определить, как на этой установке скажется работа в жестких условиях и как на нее повлияют песчаные бури.

Хотя в настоящее время еще нет полной ясности, стартует ли когда-нибудь «саморазмножение» СЭС в Сахаре, однако если план сработает, то к 2050 г. та самая первая 100-киловаттная установка «размножится» до мощности системы установок в 100 ГВт, что составляет огромную величину – примерно 3% от установленной мощности электростанций всего мира.

### Литература

1. Карабанов С., Кухмистров Ю. Фотоэлектрические системы. Перспективы. Состав. Параметры // Электронные компоненты. – 2000. – №5.
2. Прищенко А. Основы применения солнечных панелей для промышленных солнечных электростанций // Электрик. – 2011. – №12.
3. Солнечные электростанции в Сахаре. - <http://ecoenergy.org.ua/solnechnyie-batarei/solnechnyie-elektrostantszii-v-saxare>.