

А.В. Козлов, А.В. Юрченко, Д.А. Пестунов

Влияние параметров атмосферы на энергетические характеристики кремниевой солнечной батареи

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск
Томский политехнический университет*

Поступила в редакцию 7.06.2005 г.

Описана станция мониторинга работы солнечной батареи, и приведены результаты ее работы. Рассмотрено влияние температуры на выходные характеристики солнечной батареи. Рассчитываются температурные коэффициенты напряжения холостого хода, тока короткого замыкания и ряда других параметров.

Введение

В условиях уменьшения мировых запасов природного топлива (невозобновляемых ресурсов) большое внимание уделяется использованию солнечной энергии путем ее прямого преобразования в электрическую. Для этой цели применяются кремниевые солнечные элементы (СЭ). Они являются главным источником электроэнергии в космических аппаратах. Однако широкое использование СЭ на Земле сдерживается их значительной стоимостью. Ее снижение в основном ведется за счет уменьшения стоимости монокристаллического кремния и создания дешевых пленочных элементов на основе аморфного кремния. В обоих случаях важны деградиционные и энергетические характеристики СЭ и соответственно солнечных батарей (СБ), изготавливаемых на их основе.

Во время преобразования солнечного излучения (особенно при высоких уровнях солнечной радиации) в СБ выделяется некоторое количество тепла и рабочая поверхность может нагреваться до 80–100 °С. Это приводит к повышенному износу СЭ и снижению энергетических характеристик СБ при их использовании. Концентрация дефектов, определяющая степень деградации параметров элемента, будет зависеть не только от плотности интегрального потока солнечной радиации, но и от рабочей температуры СБ [1]. Поэтому необходимо изучение влияния температуры и освещенности на фотоэлектрические и радиационные характеристики кремниевых СЭ, работающих в натуральных условиях.

Этой проблемой авторы занимаются с 1996 г.

В Институте оптики атмосферы СО РАН на ТОР-станции [2] была установлена кремниевая солнечная батарея МС-14-10 мощностью 10 Вт, изготовленная ФГУП НИИПП г. Томск. Измерения проводились в 1996–2002 гг. Станция измеряла температуру, давление, влажность, скорость ветра, солнечную радиацию и т.д., а также ток короткого замыкания солнечной батареи. Из полученных данных был оценен КПД солнечной батареи. Рассчитанный КПД составляет ~13% и фактически совпадает с КПД солнечной батареи, измеренным в лабораторных ус-

ловиях (КПД = 13,8% при $P = 1000 \text{ Вт/м}^2$, $T = 25 \text{ °С}$). На основе этих данных и данных по интегральной солнечной радиации была оценена эффективность СБ в натуральных условиях. За 1 год на 1 м^2 земной поверхности приходится (в среднем за 6 лет) $1165 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ солнечной энергии, т.е. батарея МС-14-10 площадью $0,18 \text{ м}^2$ с КПД = 13% вырабатывает в среднем $28 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}$ [3, 4].

Из 38 параметров, измеряемых ТОР-станцией и характеризующих состояние атмосферы, по данным испытаний выделены по величине коэффициента корреляции $K_s \geq 0,3$ те, которые влияют на работу СБ в натуральных условиях [3, 4]. Это солнечная радиация ($K_s = 0,9$), влажность ($-0,44$), температура ($0,3$).

Кроме того, была оценена деградация тока короткого замыкания (КЗ) СБ. Для этого из всего массива данных, для каждого года, были рассчитаны средние значения тока КЗ для разных диапазонов солнечной радиации S_g (> 900 , $800\text{--}900$, $700\text{--}800$, $600\text{--}700 \text{ Вт/м}^2$) при условии одинакового времени ($12\text{--}14 \text{ ч}$) и влажности ($55\text{--}65\%$). На рис. 1, а представлена динамика изменения тока КЗ в течение 6 лет испытаний СБ. При других значениях влажности и времени характер зависимостей не меняется. На 1, б представлена усредненная относительная деградация тока КЗ по отношению к начальному уровню.

Из рис. 1, б видно, что со временем происходит уменьшение тока КЗ. Так, ток КЗ за период 1996–2002 гг. уменьшился на 14%. Это связано прежде всего с внесением радиационных дефектов в структуру солнечной батареи. В 2002 г. произошли разгерметизация солнечной батареи и выход ее из строя.

Условия этого эксперимента не позволили оценить влияния параметров атмосферы на другие характеристики солнечной батареи — напряжение холостого хода, мощность, вольтамперную характеристику. Поэтому в конце 2004 г. была спроектирована и собрана специальная станция для испытания работы солнечной батареи. Она позволяет измерять вольтамперную характеристику и температуру рабочей поверхности СБ, температуру, влажность и давление воздуха. В марте 2005 г. на мобильной станции начались испытания.

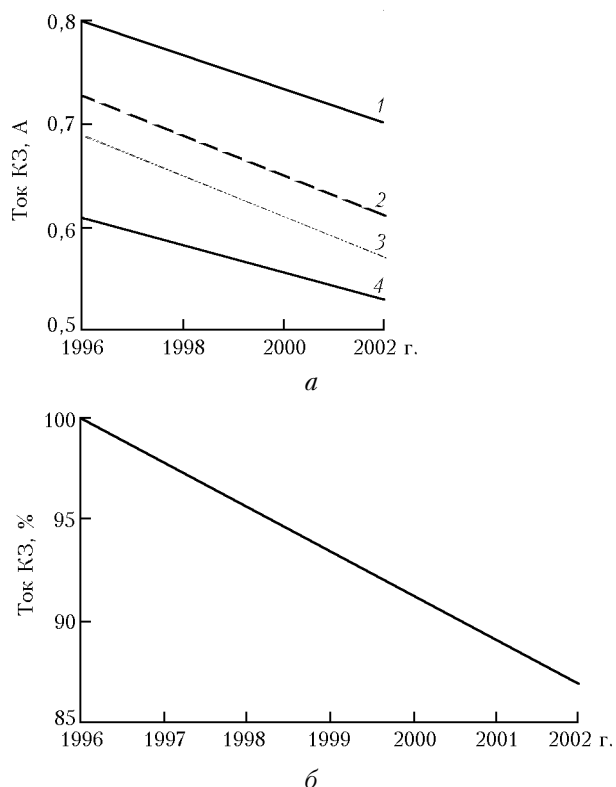


Рис. 1. Динамика изменения тока КЗ в течение 6 лет испытаний СБ: *a* – 1 – $S_r > 900$; 2 – $800 < S_r < 900$; 3 – $700 < S_r < 800$; 4 – $600 < S_r < 700 \text{ Вт/м}^2$; *б* – усредненная относительная деградация тока КЗ

Станция мониторинга работы солнечной батареи

В состав комплекта станции входят: исследуемая солнечная батарея, измерительный блок, датчики

температуры воздуха (ДТВ) и температуры рабочей поверхности (ДТП) СБ, датчики влажности (ДВВ) и давления воздуха (ДДВ), пиранометр (П) который измеряет суммарную солнечную радиацию, а также компьютер с установленным специально разработанным программным обеспечением (ПО). Все датчики подключаются к измерительному блоку. Датчики влажности, давления и пиранометр имеют аналоговый выходной сигнал, и для передачи их значений на компьютер используется аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Причем все аналоговые датчики используют один канал АЦП, подключаясь к нему по очередности через аналоговый ключ. Очередность задается командами с компьютера. Датчики температуры имеют выходной сигнал цифровой формы. Обмен данными датчиков температуры и измерительного блока происходит по шине I2C. В измерительный блок входит схема электронной нагрузки (ЭН), которая по команде с компьютера устанавливает заданный ток СБ. Напряжение и установленный ток СБ измеряются АЦП. Измерение установленного тока необходимо для контроля работы ЭН. Далее измерительный блок направляет результаты в компьютер (рис. 2). В таблице приведены характеристики мобильной станции.

Специально разработанное ПО для персонального компьютера контролирует и управляет измерительным прибором, задавая ему режимы измерения. Результатом каждого измерения являются: вольт-амперная характеристика солнечной батареи и ее температура, температура, влажность и давление воздуха, а также мощность солнечного излучения. Результаты сохраняются в файл для последующего анализа. Программное обеспечение позволяет задать продолжительность и частоту измерений. На мобильной станции можно проводить измерения в реальном времени с помощью восьми солнечных батарей мощностью от 10 до 50 Вт.

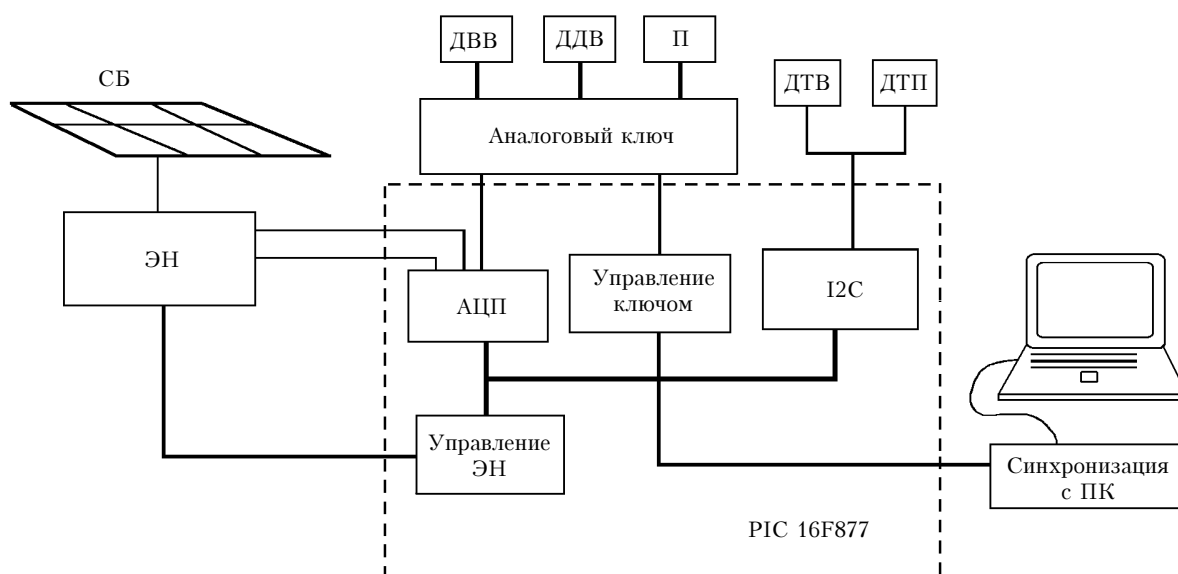


Рис. 2. Блок-схема станции

Характеристики станции

Параметр	Значение/диапазон	Погрешность
<i>Измеряемые характеристики солнечной батареи</i>		
Напряжение холостого хода, В	0...20	$\pm 0,3$
Ток короткого замыкания, А	0,1...2,5	$\pm 0,05$
Температура рабочей поверхности, °С	-50...+125	$\pm 0,5$
<i>Измеряемые параметры окружающей среды (воздуха)</i>		
Температура, °С	-50...+125	$\pm 0,5$
Влажность, %	0...100	± 2
Давление воздуха, мм рт. ст.	700...800	± 5
Солнечная радиация, Вт/м ²	0...1300	—
<i>Другие характеристики мобильной станции</i>		
Напряжение питания, В	220	
Потребляемый ток, А	1	
Питание от аккумуляторов, В	18...24	
Высота, мм	90	
Ширина, мм	275	
Длина, мм	195	

Результаты испытаний солнечной батареи на станции мониторинга

Станция работает следующим образом. Измерения начинаются в начале каждого часа. Затем однократно с интервалом 1 мин регистрируются вольт-амперная характеристика (ВАХ) СБ и ее температура, температура воздуха, вычисляется рабочая точка ВАХ. По истечении 15 мин измерения прекращаются до начала следующего часа. В итоге одного цикла для каждого параметра набирается одномерный массив, состоящий из 15 элементов. Далее массив усредняется и полученный результат сохраняется в файл данных. Причем результаты измерения, где ток короткого замыкания СБ меньше 0,1 А, не сохраняются. Такие значения тока короткого замыкания соответствуют сумеркам или ночной фазе суток и не представляют интереса для исследования. На рис. 3 приведены зависимости напряжения холостого хода, кпд, тока короткого замыкания солнечной батареи от рабочей температуры. Штриховыми линиями на графиках обозначены теоретические значения параметров.

Из рис. 3 следует, что при увеличении температуры солнечной батареи с 5 до 40 °С ($\Delta T = 35$ °С) напряжение холостого хода уменьшается на 14%, а кпд падает с 13 до 8%. При этом разница температуры воздуха и солнечной батареи составляет от 10 до 20 °С. В предыдущем эксперименте [3, 4] температура солнечной батареи не измерялась и поэтому не были четко оценены зависимости параметров СБ от этой характеристики. По результатам настоящего эксперимента можно сказать, что температурный коэффициент напряжения холостого хода $\Delta U_x / \Delta T = -75$ мВ/°С; температурный коэффициент тока короткого замыкания $\Delta I_{КЗ} / \Delta T = 5$ мА/°С; температурный коэффициент пиковой мощности $\Delta W / \Delta T = 0,177$ Вт/°С; температурный коэффициент кпд $\Delta \eta / \Delta T = -0,2$ %/°С.

Рост тока короткого замыкания при повышении температуры объясняется изменением поглощения света. При повышении температуры СБ происходит смещение края поглощения, связанное с сужением

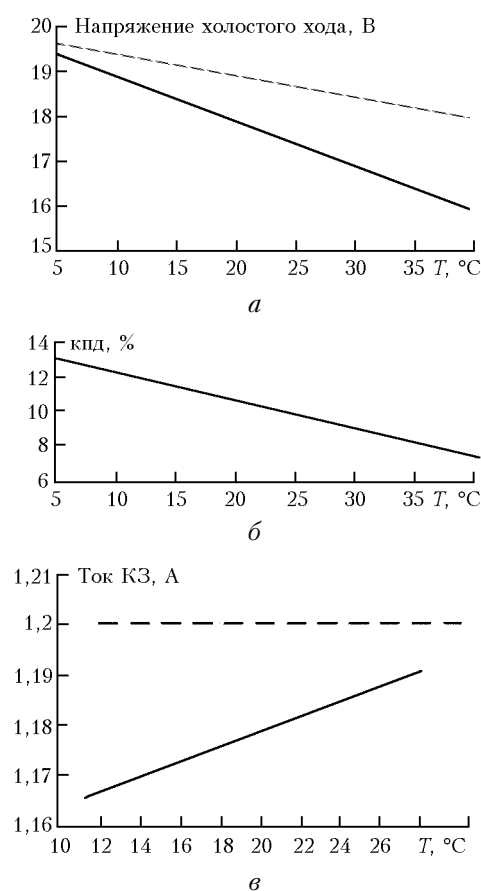


Рис. 3. Зависимости параметров солнечной батареи от рабочей температуры: а – напряжение холостого хода; б – кпд рабочей температуры; в – ток короткого замыкания

ширины запрещенной зоны кристалла, и увеличивается число пар, генерируемых в объеме, что приводит к увеличению тока короткого замыкания. С другой стороны, с увеличением температуры изменяется коэффициент поглощения света. В результате ток увеличивается с повышением температуры (рис. 3, в).

Из теории известно, что ВАХ кремниевых фотоэлементов достаточно хорошо описывается уравнением [5]:

$$I(U, T) = I_{\phi} - I_s(T) \exp\left[\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1\right], \quad (1)$$

где I_{ϕ} – ток, возникший под воздействием света; I_s – обратный ток фотоэлемента; T – температура СБ, К; q – заряд электрона.

График такой зависимости при разной температуре приведен на рис. 3, *a* пунктирной линией. Видно, что качественно экспериментальные данные соответствуют теоретическим.

Уменьшение напряжения холостого хода при повышении температуры связано с изменением собственной концентрации носителей заряда и ширины запрещенной зоны кристалла. В общем случае напряжение холостого хода определяется соотношением

$$U_{x.x} \sim \ln \frac{I_{K3}}{I_s}, \quad (2)$$

согласно которому $U_{x.x}$ должно повышаться при увеличении I_{K3} . Сужение ширины запрещенной зоны при повышении температуры вызывает увеличение обратного тока (I_s). Резкое повышение обратного тока I_s , протекающего через p – n –переход, приводит к уменьшению напряжения холостого хода и тем самым сводит к минимуму положительный эффект увеличения тока короткого замыкания. При повышении температуры коэффициент заполнения ВАХ падает, что объясняется увеличением обратного тока. Основной причиной уменьшения выходной мощности и КПД является уменьшение напряжения холостого хода и коэффициента заполнения ВАХ.

Работа выполнена при поддержке ведомственной научной программы «Развитие научного потенциала высшей школы».

A. V. Kozlov, A. V. Yurchenko, D. A. Pestunov. Influence of atmospheric parameters on the energy characteristics of a silicon solar battery.

The solar battery monitoring station is presented. The results of the station operation are shown. The influence of the temperature on the output performance of the solar battery is described. The calculation of the voltage temperature coefficients of the idling, of the short circuit and of some other parameters are given.

Заключение

Разработана и прошла пробную эксплуатацию в течение 3 мес станция мониторинга работы СБ, которая может быть использована как в стационарных условиях, так и в передвижных, переносных и т.д.

По результатам ее работы были определены температурные коэффициенты напряжения холостого хода, тока короткого замыкания, пиковой мощности и КПД.

По измерениям с марта по май 2005 г. установлено, что разница между температурой воздуха и температурой поверхности СБ может достигать 20 °С. В летнее время разница температур будет достигать больших значений.

1. Бариков М.Я. Фотоэлектрические и радиационные характеристики кремниевых солнечных элементов при повышенных освещенностях и температурах // Физ. и техн. полупровод. 1997. Т. 31. № 5. С. 520–522.
2. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ковалевский В.К., Плотников А.П., Покровский Е.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н. Автоматический пост для мониторинга малых газовых составляющих атмосферного воздуха // Метеорол. и гидрол. 1999. № 3. С. 110–118.
3. Бакин Н.Н., Юрченко А.В. Результаты климатических испытаний солнечной батареи в природных условиях г. Томска // Оптика атмосф. и океана. Т. 11. 1998. № 12. С. 1337–1340.
4. Юрченко А.В. Результаты климатических испытаний работы солнечной батареи в условиях г. Томска // Изв. МАН ВШ. 2004. № 2 (28). С. 145–150.
5. Васильев А.М., Ландсман А.П. Полупроводниковые фотопреобразователи. М.: Сов. радио, 1971. 246 с.