

УДК 621.383.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

Ф.В. Саврасов, И.К. Ковалев*

Томский политехнический университет

*ОАО «НИИПП», г. Томск

E-mail: savrasov@tpu.ru

Проведено тестирование раскладной солнечной батареи СФБ-150, разработанной в НИИ полупроводниковых приборов г. Томска. Представлены эмпирические коэффициенты и отношения, выведенные при обработке полученных результатов. Произведен анализ работы солнечной батареи с учетом ее географического местоположения и климатических условий региона, сделаны выводы и рекомендации.

Ключевые слова:*Солнечная батарея, выходная мощность, буферный аккумулятор.***Key words:***Solar battery, output power, buffer accumulator.***Введение**

Важнейшей характеристикой фотоэлектрических систем является количество электроэнергии, выработанной за период (сутки, месяц, год). В то же время печатных работ по выявлению этого параметра в натуральных условиях не очень много. Среди прочих можно выделить работы [1–4], где приводятся обобщенные сведения о результатах измерений различных фотоэлектрических параметров для нескольких типов кремниевых пластин. В статье [5] также исследуется температурное воздействие при использовании солнечного концентратора.

В этих работах приводятся результаты съёма электроэнергии со стационарно установленных фотоэлектрических систем без автоматической ориентации их рабочей поверхности на Солнце. Это экономически оправдано, но в указанных работах не оцениваются потери в выработке электроэнергии стационарно установленных фотоэлектрических устройств по сравнению с автоматическими ориентирующимися, а также не проанализировано влияние географической широты местности, внешней нагрузки и климатических особенностей региона в период наблюдений.

Целью настоящей работы является исследование функционирования солнечной батареи (СБ) в полевых условиях при различных углах наклона панели к падающему световому потоку.

Начальные условия

Солнечная батарея СФБ-150 (рис. 1), разработанная в НИИ полупроводниковых приборов г. Томска, была развернута в пос. Сураново Кемеровской области (50 км к югу от г. Томска). Вследствие конструктивных особенностей СБ выполнена раскладной, что обеспечило снижение веса в два раза по сравнению с промышленными образцами батарей в металло-стеклянном обрамлении аналогичной пиковой мощности (150 Вт). Батарея (габаритные размеры – 1700×860×6 мм в развёрнутом виде, и 430×430×65 мм в свёрнутом) складывается

в компактный пакет, который легко транспортировать (в случае бездорожья – перенести на руках, т. к. масса устройства не превышает 12 кг) к месту установки.

Рабочая поверхность СБ была стационарно ориентирована на юг под углом 55° к поверхности Земли. В этом положении СБ неизменно находилась с начала июня 2011 г. до начала сентября. Для оценки работы СБ в случае, если она постоянно была бы ориентирована на Солнце, использовался отдельный небольшой солнечный модуль, изготовленный на основе того же самого полупроводникового материала, что и исследуемая СБ.

Погодные условия**и географическая широта местности**

В пос. Сураново и его окрестностях отсутствуют промышленные предприятия и автотранспорт. Следовательно, загрязнение атмосферы, снижающее ее прозрачность, сведено к минимуму.

Территория, где проводилось тестирование СБ, расположена на широте 56°30' с.ш. С широтой местности связано перемещение Солнца по небосводу в азимутальном и зенитальном направлении в течение светового дня. Без учета погодных условий имеет место следующая зависимость: чем севернее территория, тем больше выработка электричества на основе энергии Солнца летом и меньше зимой. Расчетным путем определена сумма часов светлого времени в окрестностях Томска за три летних месяца, величина составила 1520 ч. Для расположенного южнее г. Новосибирска эта величина меньше на 25 ч, а для г. Барнаула – более чем на 50 ч.

Погодные условия лета 2011 г. характеризовались теплым и солнечным июнем и пасмурными и холодными июлем и августом. По данным сайта лаборатории климатологии атмосферного состава Института оптики атмосферы г. Томска, среднемесячная температура июня была одной из самых высоких с 1993 г., а среднемесячные температуры июля и августа – одними из самых низких. В целом,

суммарная инсоляция лета 2011 г. была примерно на 15 % меньше средней многолетней.



Рис. 1. Солнечная батарея СФБ-150

Измерения

Периодически, в различное время светового дня, проводились измерения тока короткого замыкания $I_{кз}$ и напряжения холостого хода $U_{хх}$ развернутой СБ. Одновременно, наряду со стационарно установленной СБ, измерялся ток короткого замыкания дополнительного солнечного модуля, который: а) располагался в плоскости СБ; б) был точно ориентирован на Солнце. Это позволило рассчитать выработку электроэнергии исследуемой СБ для случая, если бы она автоматически ориентировалась в направлении Солнца в течении всего периода наблюдений.

Исследуемая солнечная батарея и фотоэлектрический модуль-спутник были изготовлены из пластин монокристаллического кремния одной партии. В данной работе модуль-спутник являлся небольшим фрагментом измеряемой солнечной батареи. Согласно физике работы полупроводниковых фотоэлементов, в данном случае ток короткого замыкания прямо пропорционален площади приемной поверхности фотоэлемента при данной интенсивности солнечного излучения. Измеряя ток короткого замыкания модуля-спутника в плоскости исследуемой солнечной батареи $I_{кз1}$ и затем, ориентируя модуль на солнце таким образом, чтобы зафиксировать максимальное значение тока короткого замыкания $I_{кз2}$, вычисляется отношение $I_{кз2}/I_{кз1}$, которое впоследствии переносится на большую солнечную батарею. Ориентация модуля-спутника на солнце по достижению максимального значения тока короткого замыкания производилась с использованием держателя, осуществляющего ориентацию в азимутальном и зенитальном направлении.

Также были проведены эксперименты по подключению к СБ внешней нагрузки.

Функциональные особенности

Электрическая мощность стационарно установленной СБ зависит от:

- изменения угла падения солнечных лучей, обусловленного суточным и сезонным перемещением Солнца по небосводу для данной широты местности;
- изменения интенсивности солнечного излучения в зависимости от прозрачности атмосферы и облачности;
- суточных и сезонных изменений температуры окружающего воздуха;
- разогрева фотоэлектрических преобразователей при возрастании светового потока.

При определенной освещенности отбор максимальной мощности ($P_{max} = U_{max} \cdot I_{max}$) от СБ имеет место только в том случае, если сопротивление внешней нагрузки удовлетворяет соотношению: $R_n = U_{max} / I_{max}$. При постоянной нагрузке изменение освещенности рабочей поверхности батареи приводит к рассогласованию СБ с внешней нагрузкой, и отбор мощности будет ниже максимально возможных значений.

Для фотоэлектрических преобразователей из монокристаллического кремния авторами экспериментально была установлена связь P_{max} , U_{max} , и I_{max} с $U_{хх}$ и $I_{кз}$:

$$P_{max} = (0,70...0,75) U_{хх} \cdot I_{кз}. \quad (1)$$

Значения U_{max} и I_{max} приблизительно связаны с $U_{хх}$ и $I_{кз}$:

$$U_{max} \approx 0,85 U_{хх}, \quad I_{max} \approx 0,85 I_{кз}. \quad (2)$$

Тогда значение сопротивления нагрузки, на котором рассеивается максимальная электрическая мощность при данной освещенности, составляет:

$$R_n \approx 0,85 U_{хх} / (0,85 I_{кз}) \approx U_{хх} / I_{кз}. \quad (3)$$

Результаты измерений электрических параметров

Значения тока короткого замыкания в полуденные часы (от 12 до 15 ч) при отсутствующей облачности составляли в среднем 4,5 А. Напряжение холостого хода фиксировалось в диапазоне 36...39 В, что ниже значений, наблюдаемых при температуре СБ 300 К. Причина уменьшения $U_{хх}$ – саморазогрев фотоэлектрических преобразователей под действием солнечного излучения. Установившаяся температура СБ в рабочем режиме зависела также и от температуры окружающего воздуха, влажности, скорости и направления ветра. Очевидно, что отвод тепла от кремниевых пластин СБ затруднен конструктивными особенностями испытываемой солнечной батареи (элементы с низкой теплопроводностью: текстолитовая подложка, тряпичная окантовка, слой связующего клеящего материала, ламинирующая пленка), что приводит к некоторому уменьшению КПД СБ.

Максимально зафиксированное значение $I_{кз}$ составило 4,9 А при напряжении холостого хода 36,9 В (при низкой скорости ветра и высокой температуре воздуха). Согласно выражению (1) значение максимальной мощности СБ в этом случае составляет примерно 130 Вт. Наибольшее значение

P_{\max} (около 135 Вт) зафиксировано при $I_{\text{кз}}$, равном 4,82 А, и $U_{\text{кз}}$, равном 37,7 В. Среднее значение максимальной мощности в полуденные часы солнечных дней составило 120 Вт. Это примерно на 25...30 % ниже паспортной пиковой мощности (150 Вт) солнечной батареи, которая могла быть достигнута при плотности потока солнечного излучения 1000 Вт/м². Это еще раз указывает на неблагоприятные условия для солнечной электроэнергетики лета 2011 г. в Сибири.

На рис. 2 представлен дневной ход тока короткого замыкания СБ при отсутствующей облачности (верхняя кривая) и при полной облачности (нижняя кривая). В пасмурный день солнечный свет изредка проникал сквозь облака, что отражено на графике локальными максимумами. Оценка выработки электроэнергии в ясный день на согласованную нагрузку составляет примерно 1 кВт·ч, а в пасмурный день – около 0,25 кВт·ч.

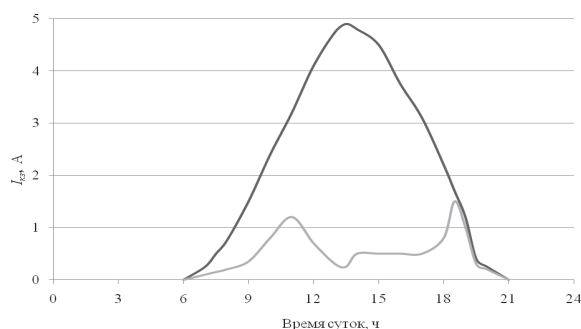


Рис. 2. Изменение значений $I_{\text{кз}}$ при отсутствующей и полной облачности

Общеизвестно, что ориентация солнечных модулей в направлении Солнца обеспечивает увеличение выхода энергии в течение светового дня по сравнению со стационарными солнечными энергоустановками. На рис. 3 представлен дневной ход $I_{\text{кз}}$ в ясный день для исследуемой СБ (внутренняя кривая) и ход $I_{\text{кз}}$, который бы имел место, если СБ была бы постоянно ориентирована в направлении Солнца (внешняя кривая).

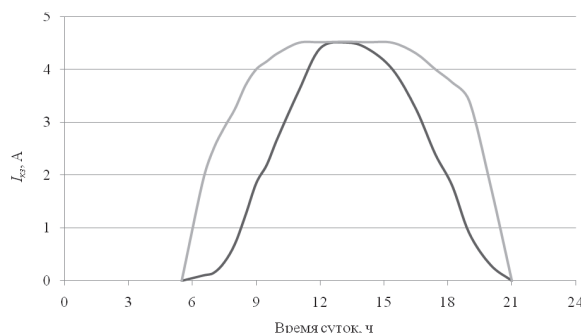


Рис. 3. Выработка тока при ориентации СФБ-150 в направлении Солнца

Расчет возможной выработки электроэнергии за день постоянно ориентированной на Солнце СБ показывает, что она может составить в середине лета 1,5 кВт·ч, а это почти на 40 % больше, чем

у стационарно установленной СБ (1 кВт·ч). Наибольшее различие выработки электроэнергии имеет место в наиболее длинные дни. Соответственно, чем короче день, тем это различие меньше. Если гипотетически предположить, что все 1250 ч летнего времени были ясными, как в пустыне, то тестируемая СБ, постоянно ориентированная в направлении Солнца, на широте Томска обеспечивала бы выработку за лето 120 кВт·ч электроэнергии. Фактический энергоресурс неориентированной СФБ-150 в зависимости от суммарного количества часов солнечного сияния в различные годы может составить 40...70 кВт·ч. Количество возможной выработки электроэнергии исследуемой СБ за лето 2011 г. оценивается в 50 кВт·ч.

Внешняя нагрузка

Одним из негативных свойств СБ является то обстоятельство, что отбор максимальной мощности от солнечной батареи имеет место, когда сопротивление внешней нагрузки удовлетворяет условию (3). Поскольку при постоянной внешней нагрузке это условие непрерывно нарушается в зависимости от освещенности и температуры, то необходимо учитывать данное обстоятельство при разработке солнечных электроустановок.

В процессе измерений исследовалась зависимость выходной мощности СБ от сопротивления нагрузки в пасмурный день (в качестве нагрузки использовался магазин сопротивлений Р33). По результатам этих измерений на рис. 4 представлена вольтамперограмма, а на рис. 5 – зависимость выходной мощности СБ от сопротивления нагрузки. Обращает на себя внимание, что значения P_{\max} , U_{\max} и I_{\max} (рис. 4) достаточно хорошо согласуются с выражениями (1) и (2). Нагрузочная кривая (рис. 5) имеет острый максимум (27,5 Вт на сопротивлении нагрузки $R_{\text{н}}$ в 43 Ом) и спад разной крутизны в обе стороны от него. На уровне 80 % от максимальной мощности (20 Вт) диапазон сопротивлений нагрузки приходится на достаточно широкую область значений – 28...68 Ом, что можно считать благоприятным фактором для практического использования солнечных батарей при создании электрогенерирующих установок.

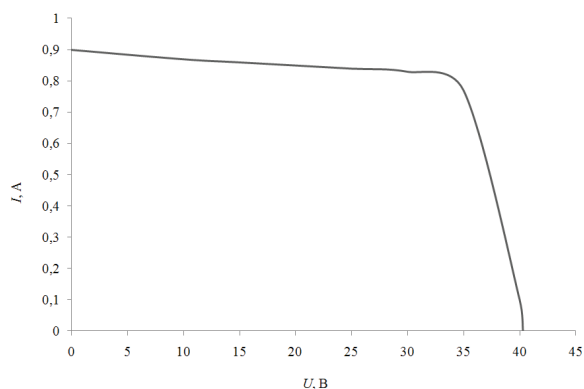


Рис. 4. Вольтамперная характеристика СФБ-150 при полной облачности и температуре 25 °C

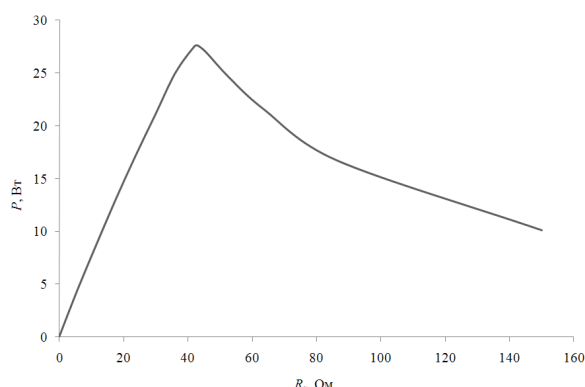


Рис. 5. Нагрузочная характеристика СФБ-150 при полной облачности и температуре 25 °С

При подключении внешней нагрузки непосредственно к солнечной батарее напряжение на нагрузке будет зависеть от освещенности и температуры. Хорошим стабилизатором выходного напряжения СБ является буферный аккумулятор (например, СТ-190). Однако отбор максимальной мощности от СБ при зарядке или подзарядке буферного аккумулятора будет иметь место, если напряжение холостого хода СБ согласно выражению (2) будет порядка $(1,2...1,4) U_{зар}$, где $U_{зар}$ — напряжение полностью заряженного аккумулятора.

Это условие не выполняется при подключении к исследуемой СБ аккумулятора Smart-UPS SUA24XLBP напряжением 24 В. Оптимальным значением $U_{зар}$ для данного аккумулятора следует считать 25...27 В, что существенно ниже реальных значений $U_{хх}$ в полдень ясного летнего дня (36...39 В). Приблизительные оценки показывают, что отбор мощности от СБ в этом случае будет составлять всего 50...60 % P_{max} . В ходе исследований к СБ в ясный солнечный день был подключен резистор сопротивлением 7 Ом, помещенный для охлаждения в воду. Мощность, рассеянная на этой нагрузке, оказалась равной 75 Вт. Расчетная максимальная

мощность по формулам (1)–(3) при освещенности, имевшей место во время измерений, должна быть 120 Вт (при нагрузке в 9 Ом). В данном случае отбор мощности от СБ составил всего 62,5 % P_{max} .

За три летних месяца СБ испытала воздействие Солнца, ветра, дождя, росы, инея и смены температур окружающего воздуха. Работоспособность СБ при этом не ухудшилась. Удаление утренней росы с поверхности фотоэлементов не сопровождалось изменением $I_{кз}$.

Выводы

- Экспериментально установлено, что максимальная выходная мощность, вырабатываемая солнечной батареей СФБ-150, изготовленной из элементов на основе монокристаллического кремния, находится в пределах 0,70...0,75 от произведения напряжения холостого хода и тока короткого замыкания этой батареи.
- Наличие автоматической ориентации батареи в направлении Солнца при её использовании на территории юга Томской области позволит в весенне-летне-осенний период повысить выработку электроэнергии до 40 %.
- Изменения значений параметров солнечной батареи СФБ-150 от воздействия дождя, инея, росы, солнечного нагрева, смены температур окружающего воздуха за время наблюдений не обнаружено, что допускает применимость материалов, из которых состоит данная батарея, при изготовлении других устройств подобного типа для их использования в условиях сибирского климата.
- При изменении угла наклона поверхностей исследуемых фотоэлементов к солнечному световому потоку изменяется также временной период, в течение которого возможно получение максимального значения выходной мощности батареи, при этом изменение самого значения является незначительным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрченко А.В. Результаты натурных испытаний кремниевой солнечной батареи в климатических условиях г. Томска // Известия Международной академии наук высшей школы. — 2004. — № 2 (28). — С. 145–150.
2. Козлов А.В., Ковалевский К.В., Юрченко А.В. Результаты климатических испытаний кремниевой солнечной батареи в натурных условиях г. Томска // Возобновляемая энергетика. Состояние, проблемы, перспективы: Матер. Междунар. конф. — СПб., 2003. — С. 275–281.
3. Topic M., Brecl K., Sites J. Effective efficiency of PV modules under field conditions // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. — 2007. — V. 15. — Iss. 1. — P. 19–26.
4. Durisch W., Struss O., Kai R. Efficiency of selected photovoltaic modules under varying climatic conditions // Renewable energy — the energy for the 21st century: Proc. of VI World renewable energy congress. — Brighton, Great Britain, 2000. — P. 779–788.
5. Бакиров М.Я. Фотоэлектрические и радиационные характеристики кремниевых солнечных элементов при повышенных освещенностях и температурах // Физика и техника полупроводников. — 1997. — № 5 (31). — С. 520–522.

Поступила 12.01.2012 г.