

На правах рукописи



Козлов Артем Владимирович

КОНТРОЛЬ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЕВОЙ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

Специальность 05.11.13 Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата
технических наук

Томск - 2008

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент ТПУ, г. Томск.
Юрченко Алексей Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, с.н.с.
Зыков Владимир Михайлович

доктор технических наук, профессор Сырякин Владимир Иванович,

Ведущая организация: ОАО “Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов” г.
Томск.

Защита состоится 30 декабря 2008 г. в 15:00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д
212.269.09 при Томском политехническом университете по адресу: Россия, 634028, г. Томск ул. Савиных, д. 7 НИИ
ИН 215 ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул.
Белинского, 53

Автореферат разослан « » ноября 2008 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д
212.269.09 кандидат технических наук,
доцент



Б.Б. Винокуров

Актуальность работы

Актуальность представленной тематики обусловлена высокими темпами развития солнечной энергетики и расширением географии использования солнечных батарей (СБ) в регионах, имеющих сложную метеорологическую и техногенную структуру атмосферы.

На сегодняшний день регионы Сибири и Дальнего Востока являются белым пятном на карте, представленной Европейской комиссией по возобновляемым источникам энергии, показывающей регионы исследований работы СБ.

Проведенная работа позволит расширить традиционную географию использования кремниевых солнечных энергетических установок в России (Алтай, южные области и республики РФ и т.д.) на регионы, где ранее солнечная энергетика не использовалась, такие как Томская, Новосибирская области, Якутия, Сахалин и т.д.

В связи с тем, что стоимость традиционных источников энергии стремительно растет, в настоящее время в регионах без стационарной сети электропитания вместо дизельных электрогенераторов все чаще применяют солнечные энергетические установки (СЭУ). Это не только позволяет снизить экологическую нагрузку на экосферу, но и экономически выгодно. Так, например, в Приморском крае на удаленной ретрансляционной станции для электропитания используют дизель-генератор, для которого периодически поставляют топливо. Итоговая себестоимость электроэнергии составляет 11 руб/кВт час. В тоже время при установке солнечных энергетических установок мощностью 200 Вт себестоимость электроэнергии составит 7 руб/кВт час при расчете на 10 летний срок службы системы.

Таким образом исследование работы и прогноз использования СБ в регионах Сибири и Дальнего Востока являются актуальной научной задачей.

В отличие от традиционных источников энергии, работа СЭУ зависит от многих факторов:

- аппаратных, обусловленных конструкцией и технологией изготовления СБ, углом размещения по отношению к горизонту;
- климатических, обусловленных воздействием различных климатических параметров на выходные энергетические характеристики СБ. К таким факторам можно отнести солнечную радиацию, температуру воздуха, влажность, скорость ветра, концентрация аэрозолей.

Однако при расчете конструкции для местности, где планируется использовать СЭУ, недостаточно учитываются климатические особенности региона и аппаратные факторы, обусловленные ее использованием.

Для решение данной задачи необходимо разработать модель работы СБ с учетом воздействия доминирующих климатических и аппаратных факторов, а также провести натурные испытания СЭУ при одновременном мониторинге параметров атмосферы и характеристик элементов СЭУ.

Цель.

Целью работы является разработка методов и средств исследования кремниевых СБ малой мощности с учетом воздействия природных и аппаратных факторов, а также усовершенствование методики прогнозирования вырабатываемой мощности на основе метеорологических данных региона.

Задачи.

1. Проведение натурных испытаний СБ и СЭУ до 200 Вт в Сибири и Дальнем Востоке.
2. Разработка стационарных и мобильных программно – аппаратных средств мониторинга работы кремниевых СБ в натуральных условиях.
3. Анализ одиннадцатилетней работы кремниевой СБ в натуральных условиях Сибири и Дальнего Востока, и разработка рекомендаций по их использованию в системах с автономным питанием.
4. Обоснование комплекса природных и аппаратных факторов, определяющих работу кремниевых солнечных батарей в натуральных условиях, и разработка модели их влияния.
5. Усовершенствование методики прогнозирования вырабатываемой электрической мощности кремниевой СБ малой мощности при воздействии природных и аппаратных факторов для регионов Сибири и Дальнего Востока.

Научная новизна.

1. Получена математическая совокупность соотношений, определяющих зависимость вырабатываемой мощности СБ от комплекса климатических и аппаратных факторов с погрешностью не хуже 5%, на основании которой усовершенствован метод прогнозирования вырабатываемой мощности кремниевой солнечной батареи с учетом климатических особенностей местности, в которой она будет использоваться.
2. На основе впервые проведенных в Сибири и на Дальнем Востоке долговременных испытаний кремниевой солнечной батареи мощностью до 200 Вт обоснован комплекс доминирующих параметров, оказывающих влияние на работу СБ в реальных условиях.
3. Разработана мобильная станция мониторинга, позволяющая одновременно измерять метеорологические параметры атмосферы, вольтамперную характеристику и температуру поверхности СБ.

Достоверность результатов.

Достоверность результатов работы обусловлена корректностью методик постановки эксперимента, проведением экспериментов с многократными наблюдениями.

Методы исследования.

Для расчетов коэффициентов в математической модели использовался множественный корреляционный анализ, множественный линейный регрессионный анализ. При обработке результатов измерений применялись методы математической статистики.

Апробация работы.

Результаты диссертационной работы докладывались на 12 Всероссийских и международных конференциях.

- 21st European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Dresden 4-8 September 2006;
- 22st European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Milan 3-7 September 2007;
- 23st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, 4-8 September 2008;
- Modern Techniques and Technologies. 9th International Scientific and Practical Conference of students, Post-graduates and Young Scientists. 7-11 April, 2003 Tomsk, Russia;
- 2 Всероссийская конференции молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии»;
- Возобновляемая энергетика. Состояние проблемы перспективы Международная конференция. СПб. 4-6 ноября. 2003 г.;
- Кремний 2004. Тезисы докладов Совещания. Иркутск, 5-9 июля 2004;
- III международный технологический конгресс «Военная техника, вооружение и технологии двойного применения». Омск 7-10 июня 2005 г.;
- Международный семинар «Альтернативные источники энергии и проблемы энергосбережения 30 мая –1 июня. Санкт-Петербург. 2005 г.;
- Российская конференция «Демидовские чтения» Томск 2006.
- 13th International Scientific and Practical Conference of students, Post-graduates and Young Scientists. March, 2007, Tomsk, Russia;
- XIV Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ 2008. Томск, ТПУ, 24-28 марта 2008 г.;

По теме диссертации сделано 16 публикаций, из них 3 – в изданиях рекомендуемых ВАК. Получен патент на полезную модель №75516 “Мобильная станция мониторинга работы солнечной батареи”;

Практическая значимость.

На основе одиннадцатилетнего анализа данных работы СБ в Сибири и Дальнем Востоке разработаны рекомендации по использованию СБ в этих регионах и предложена методика прогнозирования вырабатываемой мощности СБ. Рекомендации и методика используются при проектировании СЭУ для конечных пользователей в ОАО НИИПП.

Усовершенствован способ обработки и представления данных, получаемых от TOR станции, позволивший систематизировать информацию и оперативно представлять ее в глобальной сети Internet (<http://meteo.iao.ru>).

Личный вклад автора.

Автором самостоятельно разработана мобильная станция мониторинга работы солнечной батареи, выполнены изготовление, сборка и настройка основных узлов опытного образца. Самостоятельно проведены натурные испытания в Томске и на Байкале, проведен статистический анализ данных. Автором самостоятельно получены уравнения регрессии, показывающие зависимость параметров батареи от различных климатических факторов. Разработана методика прогнозирования вырабатываемой мощности солнечной батареи.

На защиту выносятся следующие положения.

1. Методика расчета вырабатываемой мощности кремниевой СБ мощностью до 200 Вт.
2. Результаты исследования влияния климатических факторов на работу кремниевой СБ.
3. Рекомендации по использованию СБ в Сибири и на Дальнем Востоке.
4. Мобильный аппаратно – программный комплекс мониторинга работы СБ совместно с метеорологическими параметрами окружающей среды.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка используемых источников из 53 наименований. Диссертационная работа содержит 110 страницы машинописного текста, включает 10 таблиц и 52 иллюстрации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе описываются электрофизические и оптические свойства кремниевых фотоэлектрических преобразователей. Приводятся основные способы прогнозирования вырабатываемой электрической мощности.

Все способы расчета вырабатываемой мощности СБ выполняются по следующим моделям:

- модель КПД;
- модель поправочных коэффициентов;
- модель физическая;
- модель статистическая.

В первой и наиболее простой модели вырабатываемая мощность считается путем умножения КПД СБ на мощность солнечного излучения, которая соответствует тому региону, где будет располагаться СБ. Этот способ расчета имеет наибольшую погрешность и носит оценочный характер.

Вторая модель – модель, в которой вводятся ряд поправочных коэффициентов для учета влияния ряда внешних факторов на КПД СБ. :

$$\eta_{CDE} = \Gamma_{SP} \cdot \Gamma_T \cdot \Gamma_G \cdot \Gamma_{IA} \cdot \Gamma_X \cdot \eta_{STC}, \quad (1)$$

где η_{STC} – КПД СБ, измеренный при стандартных условиях ($t=25^\circ\text{C}$, АМ 1.5, мощность излучения 1000 Вт/м^2);

γ_{SP} – коэффициент, учитывающий отличие спектра солнечного излучения от спектра AM 1.5;
 γ_T – коэффициент, учитывающий отличие температуры, при которой работает СБ, от стандартной;
 γ_G – коэффициент, учитывающий различия между мощностью солнечного излучения и стандартной мощностью;
 γ_{IA} – коэффициент, учитывающий угол наклона СБ.

К недостаткам такой модели можно отнести то, что эти коэффициенты применимы только для небольшой территории. В этом случае погрешность оценки составляет 20%.

Третья модель - физическая, в которой расчет мощности СБ проводится на основе решения уравнений переноса для p-n перехода полупроводникового материала с учетом разогрева СБ. Недостатком физической модели является то, что для расчета мощности СБ необходимо знать спектр солнечного излучения в каждый конкретный момент. Замена реального спектра на функцию Планка, описывающей излучение абсолютно черного тела при температуре 5800 К, приводит к ошибке порядка 10 %. Так же, для физической модели необходимо знать время жизни носителей заряда, коэффициенты диффузии, концентрации примесей и т. д., что не всегда представляется возможным.

Четвертая модель - статистическая. При анализе результатов научных исследований часто имеет место ситуация, когда количественное изменение изучаемого явления зависит от нескольких причин (факторов). При проведении экспериментов в такой множественной ситуации исследователь записывает показания приборов о состоянии функции отклика и всех факторов, от которых она зависит. Результатами наблюдений является матрица. В этом случае методы обработки данных наблюдений базируются на положениях теории вероятности и математической статистики. Для статистических методов построения эмпирических зависимостей очень важно, чтобы результаты наблюдений подчинялись нормальному закону распределения, поэтому проверка нормальности распределения – основное содержание предварительной обработки результатов наблюдений. Именно эта модель используется в данной работе для создания методики прогнозирования работы СБ в регионах Сибири и Дальнего Востока.

Во второй главе приводится анализ работы СБ в период с 1996 – 2003 гг.

В этот период СБ была подключена к одному из цифровых каналов TOR-станции мониторинга атмосферных параметров и была установлена на её крыше под углом 45 градусов к горизонту, ориентирована на расположение солнца в два часа дня. Нагрузкой являлось сопротивление величиной 5 Ом. Контрольный параметр - напряжение на этой нагрузке. Ток солнечной батареи создал на нагрузке 5 Ом, при освещении 1000 Вт/м² (AM1.5) и температуре 25°C, напряжение около 4В. Напряжение холостого хода исследуемой батареи при этих же условиях составляло 21 В. TOR-станция обеспечивала мониторинг по 38 параметрам. В результате проведенного мониторинга была собрана база данных, состоящая из следующих параметров: метеопараметры, газовый и аэрозольный состав атмосферы, ток КЗ СБ.

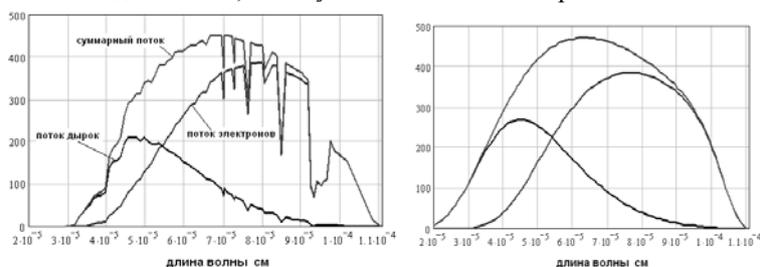
Из 38 параметров, измеряемых TOR станцией и характеризующих состояние атмосферы по величине коэффициента корреляции $K_s \geq 0.3$, те, которые влияют на работу СБ в натуральных условиях. Это солнечная радиация ($K_s=0.9$), влажность (-0.44), температура (0.3). В этом эксперименте ВАХ не измерялась.

Солнечная радиация. Преобразование энергии в СБ основано на фотовольтаическом эффекте в неоднородных полупроводниковых структурах при воздействии на них солнечного излучения. В отличие от других источников тока характеристики солнечного элемента зависят от количества падающего на его поверхность света. Например, набежавшее облако может снизить выходную мощность более чем на 50%. На выходные параметры СБ будет влиять не только суммарная солнечная радиация, но и положение солнца на небосводе. Чем ближе положение солнца к зенитному положению, тем больший ток будет вырабатывать СБ, но при этом будет иметь место и более сильный разогрев рабочей поверхности СБ.

Температура воздуха и скорость ветра. При работе СБ без охлаждения в ней выделяется большое количество тепловой энергии и рабочая температура возрастает. Значительное повышение температуры влияет на концентрацию носителей заряда, а также на процесс поглощения света, в результате чего изменяются выходные параметры СБ. Понятно, что рабочая температура СБ будет зависеть от температуры окружающего воздуха. Следует отметить влияние скорости ветра, которая может служить естественной конвекцией. Поэтому при разработке модели необходимо учитывать этот параметр.

Влажность и давление воздуха. Также на параметры СБ влияет влажность воздуха, во-первых, потому что одна из полос поглощения водяного пара лежит в спектральной области работы СБ; во-вторых, влажность может влиять на процессы теплообмена между СБ и окружающей средой.

С использованием физической модели строились графики зависимости потоков электронов, дырок и суммарного потока от длины волны для AM1.5, а – при реально измеренном спектре, б) при аппроксимации;



а)

б)

Рис. 1. Зависимости потоков электронов, дырок и суммарного потока от длины волны для AM1.5, а – при реально измеренном спектре, б) при аппроксимации;

Как видно из рис. 1, теоретический ток короткого замыкания прямо пропорционален площади фигуры, ограниченной кривой суммарного потока. В случае применения функции Планка теоретический ток короткого замыкания оказывается на 20 – 25 % больше тока КЗ, при расчете которого использовался реально измеренный спектр. Таким образом, видно, что чем больше будет содержаться влаги в воздухе, тем сильнее будет происходить поглощение солнечной радиации. В изучении поглощения радиации водяным паром широко используется понятие осажденного слоя воды. Величина осажденного слоя воды, приходящаяся на 1 км, связана с абсолютной влажностью и давлением воздуха.

Вольтамперная характеристика СБ.

Напряжение холостого хода, генерируемое одной СБ, слегка изменяется при переходе от одной СБ к другой в одной партии, от одной фирмы изготовителя к другой. Эта величина не зависит от размеров СБ. Иначе обстоит дело с током. Он зависит от интенсивности света и размера СБ, под которым подразумевается площадь его поверхности. Так как условия предыдущего эксперимента не позволили оценить влияния температуры, влажности, давления воздуха, а так же скорости ветра на ВАХ СБ, а именно на такие важные характеристики как напряжение холостого хода, максимальная мощность, то для дальнейшего проведения исследований была разработана мобильная станция мониторинга работы СБ.

В третьей главе описывается мобильная станция мониторинга работы СБ. Для расширения базы данных и оперативного контроля в различных регионах в конце 2004 года была спроектирована мобильная станция для испытания СБ. Она позволяет измерять вольтамперную характеристику СБ, температуру рабочей поверхности СБ, температуру, влажность и давление воздуха.

Мобильная станция мониторинга работы солнечной батареи содержит эквивалент нагрузки, блок управления, средства для измерения параметров учитывающих климатические факторы, а также, датчик температуры рабочей поверхности солнечной батареи, средства для измерения суммарной солнечной радиации. При этом эквивалент нагрузки и все упомянутые измерительные средства соединены с блоком управления, а эквивалент нагрузки имеет вход для соединения его с исследуемой солнечной батареей.

В качестве средств для измерения параметров, учитывающих климатические факторы, она содержит датчики температуры, влажности и давления воздуха, соединенные с блоком управления через аналоговый ключ.

В качестве средства для измерения суммарной солнечной радиации, она содержит пиранометр, соединенный с блоком управления через аналоговый ключ.

В качестве блока управления система содержит контроллер, выполняющий функции управления контролем приема и передачи данных от датчиков и электронной нагрузки, соединенных с компьютером.

Эквивалент нагрузки представляет собой источник тока, управляемый напряжением.

На рис. 2 приведена блок схема мобильной станции мониторинга работы солнечной батареи.

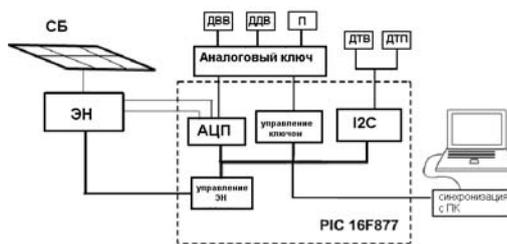


Рис. 2. Блок схема системы мониторинга работы солнечной батареи.

Программа управления мобильной станцией разработана на языке программирования Delphi. Функции программы заключаются в управлении и контроле процесса измерения и обработки и сохранения полученных данных. Программа имеет два режима работы: автоматический и ручной. В автоматическом режиме измерения проводятся в соответствии с введенными заранее настройками. Ручной режим предназначен для настройки и контроля правильности работы мобильной станции, а также для разовых измерений.

Алгоритм процедуры измерения ведется в следующей последовательности:

1. Измерения начинаются в начале каждого часа;
2. С интервалом в одну минуту регистрируется вольтамперная характеристика солнечной батареи, ее температура, температура воздуха, вычисляется рабочая точка ВАХ;
3. По истечению пятнадцати минут измерения прекращаются до начала следующего часа;
4. Для каждого параметра набирается одномерный массив, состоящий из пятнадцати элементов. Далее массив усредняется, и полученный результат сохраняется в файл данных;
5. Результаты измерения, где ток короткого замыкания солнечной батареи меньше 0.1 А, не сохраняются. Такие значения тока короткого замыкания соответствуют сумеркам или ночной фазе суток и не представляют интереса для исследования.

Были проведены испытания различных типов СБ в различных регионах. В таблице 1 приведены типы СБ, места проведения испытаний, а также объемы выборок измеренных данных.

Таблица 1

Места проведения испытаний						
Название	Объем выборки	Мощность	Время испытаний	Место	Контролируемые параметры	Тип конструкции

С-14-10	18408	10 Вт	1996-2003г.	г.Томск (ИОА СО РАН)	Ток КЗ, 38 параметров атмосферы	Триплекс
СБ-200 «ОЛЬХОН»	253	200 Вт	Зима 2002 г.	г.Томск (НИИПП)	ВАХ, основные параметры атмосферы	Триплекс
ФСМ 1.5-3 «Арктика»	511	1.5 Вт	2006 г.	г.Томск, Новосибирск, Абакан	ВАХ, солнечная радиация, Температура Воздуха и СБ	Текстолит
ФСМ 50/14	2628	25 Вт	2005,2006 г.	г.Томск (ИОА СО РАН, НИИПП)	ВАХ, основные параметры атмосферы	Стекло/ Пленка
ФСМ 25/14	1276	25 Вт	2005-2007 г.	г.Томск, Новосибирск, о.Байкал	ВАХ, основные параметры атмосферы	Стекло/ Пленка
ФСМ 25/14	373	25 Вт	2007	Владивосток	ВАХ, основные параметры атмосферы	Стекло/ Пленка

С использованием мобильной станции для батареи типа ФСМ 25/14 были получены зависимости напряжения холостого хода, КПД, тока короткого замыкания солнечной батареи от рабочей температуры (Рис.3).

Из рисунка 3 следует, что при увеличении температуры солнечной батареи с 10°C до 50°C ($\Delta T=40^\circ\text{C}$) напряжение холостого хода уменьшается с 19 до 12 В, а КПД падает с 13% до 5%. При этом разница температуры воздуха и солнечной батареи составляет от 10°C до 30 °C. В предыдущем эксперименте температура солнечной батареи не измерялась, и поэтому не были четко оценены зависимости параметров СБ от температуры СБ. По результатам настоящего эксперимента можно сказать, что температурный коэффициент напряжения холостого хода $\Delta U_x/\Delta T = -0,2\text{ В}/^\circ\text{C}$; температурный коэффициент КПД $\Delta\eta/\Delta T = -0,22\text{ \%}/^\circ\text{C}$.

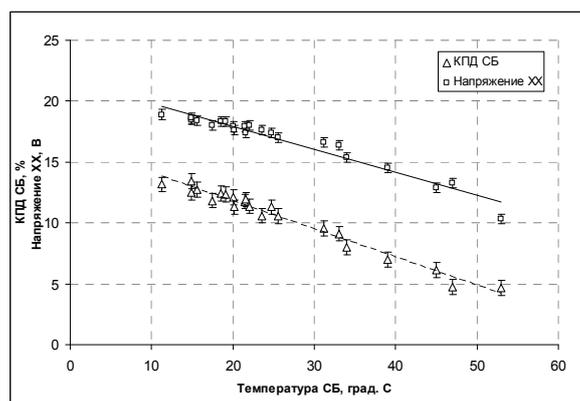


Рис. 3. Зависимости параметров солнечной батареи от рабочей температуры.

В результате проведенных исследований с использованием мобильной станции была собрана база данных, состоящая из даты, времени, метеопараметров, температуры СБ и вольтамперной характеристики. С учетом данных, собранных с 1996 года, объем базы данных составил более чем 20000 записей. База данных состоит из данных, полученных в разное время года и в различных географических местах. Такое количество данных достаточно для проведения статистического анализа и построения уравнений регрессии.

В четвертой главе описана статистическая модель работы СБ, предлагается методика прогнозирования вырабатываемой мощности СБ.

Первым этапом регрессионного анализа является определение вероятностного взаимного влияния параметров друг на друга. Для этого, используя множественный корреляционный анализ, были рассчитаны парные коэффициенты корреляции, характеризующие тесноту связи между факторами, влияющими на работу СБ. Затем, используя парные коэффициенты корреляции, был построен следующий граф:

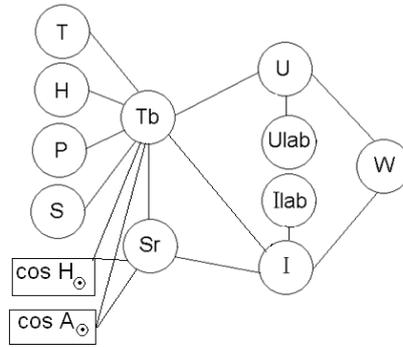


Рис. 4. Граф работы фотоэлектрических модулей. Т – температура воздуха; Н – влажность воздуха; Р - давление воздуха; S – скорость ветра; $\cos(H)$ косинус угла наклона солнца над горизонтом, $\cos(A)$ азимут солнца, Tb – температура фотоэлектрических модулей; Sr – солнечная радиация; Ulab, Ilab –напряжение и ток фотоэлектрических модулей, измеренные в лабораторных условиях; W – мощность, вырабатываемая фотоэлектрическими модулями.

На рис. 4 прямыми линиями обозначены значимые парные коэффициенты корреляции.

Известно, что максимальная вырабатываемая мощность СБ:

$$P_{\text{work}} = U_{\text{work}} \times I_{\text{work}}, \quad (2)$$

где U_{work} - рабочее напряжение;
 I_{work} - рабочий ток.

Обычно, при производстве и последующих лабораторных испытаниях СБ в основном определяются ток короткого замыкания ($I_{\text{кз}}$) и напряжения холостого хода ($U_{\text{хх}}$). Известна формула, определяющая зависимость максимальной вырабатываемой мощности СБ от тока короткого замыкания ($I_{\text{кз}}$) и напряжения холостого хода ($U_{\text{хх}}$).

$$P_{\text{work}} = K \times U_{\text{хх}} \times I_{\text{кз}}, \quad (3)$$

где K – коэффициент заполнения ВАХ;

Тогда можно записать :

$$U_{\text{work}} \sim K_{\text{хх}} \times U_{\text{хх}}, \quad (4)$$

$$I_{\text{work}} \sim K_{\text{кз}} \times I_{\text{кз}}, \quad (5)$$

где $K_{\text{хх}}$ и $K_{\text{кз}}$ – коэффициенты, учитывающие влияние климатических, аппаратных и технологических факторов.

В свою очередь напряжение холостого хода и ток короткого замыкания, измеренные в лабораторных условиях, будут отличаться от реальных в силу воздействия климатических особенностей того или иного региона.

Используя базу данных, собранную в период с 1996 по 2007 гг., можно применить статистические и вероятностные методы анализа для построения уравнений регрессий.

Для того, чтобы рассчитать максимальную вырабатываемую мощность СБ, необходимо учесть климатические факторы, которые будут влиять на напряжение и ток СБ. Такую задачу можно решить, используя многофакторный анализ, принцип которого заключается в построении такого уравнения плоскости в (p+1)-мерном (p – число факторов) пространстве, отклонение результатов наблюдений y_i от которой были бы минимальны. Или другими словами, следует вычислить значения коэффициентов b_0, b_j в линейном полиноме:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n x_i \cdot b_i, \quad (6)$$

где y – функция отклика;
 x – факторы влияющие на функция отклика.

Для статистических методов построения эмпирических зависимостей очень важно, чтобы результаты наблюдений подчинялись нормальному закону распределения. Поэтому необходимо было проверить на нормальность распределения следующие величины:

- напряжение холостого хода;
- ток короткого замыкания;
- разницу между температурой воздуха и температурой СБ.

В ходе анализа данных было показано, что эти величины имеют нормальный закон распределения. В результате многофакторного регрессионного анализа были получены следующие уравнения: Температура рабочей поверхности:

$$T_{\text{СБ}} = T_{\text{лаб СБ}} + 0.81 \cdot (T_{\text{возд}} - T_{\text{лаб возд}}) - 0.06 \cdot \text{HUM} - 0.01 \cdot \text{Press} - 0.24 \cdot \text{SPD} + 0.06 \cdot (\text{SR}_{\text{СБ}} - \text{SR}_{\text{лаб}}), \quad (7)$$

где $T_{\text{лаб СБ}}$ – температура СБ измеренная в лабораторных условиях;
 $T_{\text{возд}}$ – температура воздуха;
 $T_{\text{лаб возд}}$ – температура воздуха измеренная в лабораторных условиях;
HUM – влажность воздуха, %;
Press – давление воздуха, мм. рт.ст.;
SPD – скорость ветра, м/с;
 $\text{SR}_{\text{лаб}}$ – суммарная солнечная радиация установленная на имитаторе в лабораторных условиях (обычно 1000 Вт/м²).

Напряжение холостого хода СБ

$$U_{\text{хх}} = U_{\text{хх лаб}} - 0.1 \cdot (T_{\text{СБ}} - T_{\text{лаб СБ}}), \quad (8)$$

где $U_{\text{хх лаб}}$ - напряжение холостого хода СБ, измеренное в лабораторных условиях.

Рабочее напряжение СБ:

$$U_{\text{раб}} = 0.728 \cdot U_{\text{хх}}. \quad (9)$$

Ток короткого замыкания СБ:

$$I_{\text{кз}} = I_{\text{кз лаб}} + 0.01 \cdot (T_{\text{СБ}} - T_{\text{лаб СБ}}) - 0.004 \cdot \text{HUM} + 0.005 \cdot (\text{SR}_{\text{СБ}} - \text{SR}_{\text{лаб}}), \quad (10)$$

где $I_{\text{кз лаб}}$ – ток короткого замыкания, измеренный в лабораторных условиях.

Рабочий ток СБ:

$$I_{\text{раб}} = 0.763 \cdot I_{\text{кз}}. \quad (11)$$

Расчет максимальной мощности, отдаваемой в нагрузку производится по формуле (2).

Результаты расчета мощности по эмпирической модели представлены на рис. 5 в виде хода расчетной и измеренной мощности СБ.

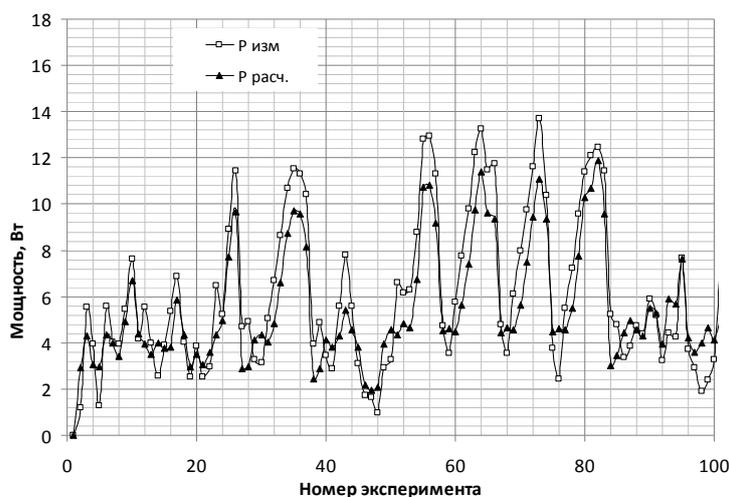


Рис. 5. Ход максимальной мощности

Для сравнения регрессионных уравнений с другими моделями были выбраны результаты измерений одного произвольно определенного дня. В этот день отсутствовала облачность, средняя температура составляла +11°С. Были проведены расчеты выработанной энергии СБ по различным моделям, включая предлагаемую. Также на график нанесена произведенная энергия СБ, которая измерялась мобильной станцией. Результаты представлены на рис. 6.

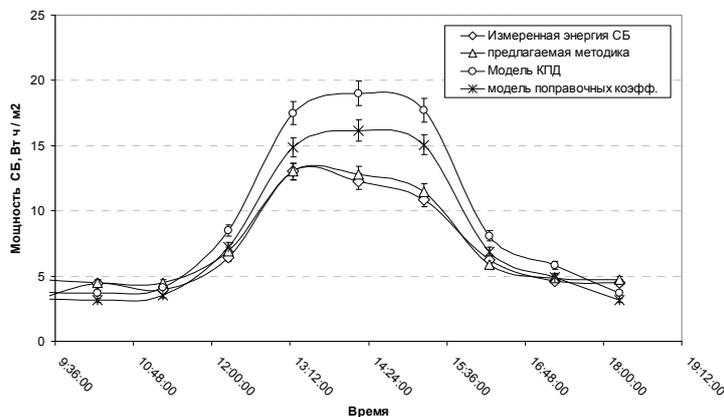


Рис. 6. Проверка моделей.

Видно, что расчетная кривая хорошо совпадает с измеренной. Разработанные уравнения регрессии обеспечивают погрешность расчета суммарной выработанной энергии не хуже 5%. Другие модели показали неудовлетворительные результаты.

Так, ошибка оценки суммарной мощности для модели КПД составила 32%, а для модели поправочных коэффициентов 15%.

Таким образом, что задача построения статистической модели вырабатываемой энергии СБ выполнена. Для использования этой модели при проектировании СЭУ необходимо усовершенствовать методику определения параметров СБ в лабораторных условиях. Обычно измерения напряжения ХХ и тока КЗ производятся за небольшой отрезок времени – освещают СБ, измеряют напряжение ХХ и ток КЗ, после чего испытания прекращаются. Предлагается измерять ВАХ СБ до тех пор, пока температура СБ не примет максимальное значение. Это позволяет определить температуру СБ, измеренную в лабораторных условиях которая используется в уравнении регрессии (7). Кроме того такой метод измерения позволяет уточнить температурные коэффициенты СБ. Исходя из вышесказанного, предлагается усовершенствованная методика прогнозирования:

1. В лабораторных условиях при стандартных значениях температуры воздуха (+25° С) и суммарной солнечной радиации (1000 Вт/м²) производятся измерения напряжения холостого хода, тока короткого замыкания, температуры солнечной батареи, коэффициента полезного действия. Испытания продолжаются до тех пор, пока температура СБ не примет максимальное значение.
2. Производится анализ метеоусловий, в которых будет работать СБ. Для этого из метеорологических справочников выбирают среднемесячные, среднесуточные значения температуры, влажности, давления воздуха, суммарную солнечную радиацию, количество солнечных дней.
3. Рассчитывается приходящая на СБ суммарная солнечная радиация из условий местоположения СБ, её угла наклона относительно горизонта, а также положения солнца на небосводе.
4. Используя полученные регрессионные уравнения, рассчитывается температура поверхности СБ, напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, рабочий ток и рабочее напряжение, а затем максимальная мощность, отдаваемая в нагрузку.
5. По полученным значениям делается вывод о порядке использования СБ в данном регионе.

Используя данные суммарной солнечной радиации и метеопараметров для г. Томска, по разным моделям было рассчитано количество энергии, которое выработала СБ в 2005 г. Также на рис. 7 представлены реально измеренные данные.

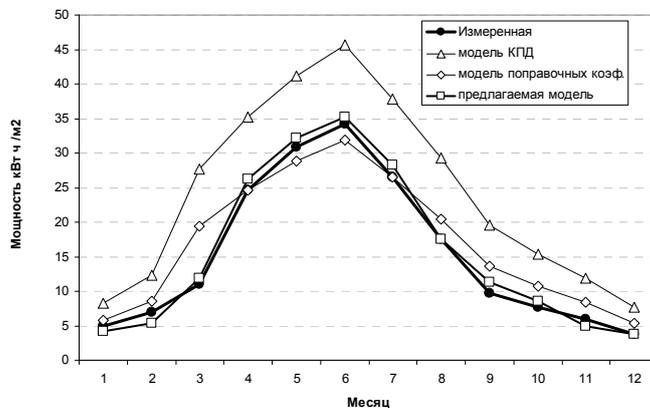


Рис. 7. Сравнение моделей

Из рис. 7 видно, что предлагаемая в этой работе модель наилучшим образом прогнозирует вырабатываемую энергию СБ в различные месяцы года. Погрешность прогноза не превысила 5 %. Суммарная мощность в период с марта по октябрь составила 160 кВт ч/м².

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Впервые в условиях Западной Сибири проведены долговременные испытания кремниевой СБ. Собрана база данных, состоящая из метеопараметров и тока КЗ солнечной батареи.
2. Сделан анализ долговременных испытаний СБ, в результате которых были определены факторы, влияющие на работу СБ. 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 природных условиях. Это солнечная радиация ($K_s=0.9$), влажность (-0.44), температура (0.3).
3. По результатам анализа долговременных испытаний была спроектирована и изготовлена мобильная станция мониторинга работы солнечной батареи. Мобильная станция измеряет основные характеристики СБ совместно с температурой, влажностью, давлением воздуха, скоростью ветра, суммарной солнечной радиацией. Патент №75516.
4. С использованием мобильной станции проведены испытания кремниевой СБ в различных регионах Сибири и Дальнего Востока. Собрана база данных, состоящая из метеопараметров и параметров СБ.
5. Предложена методика прогнозирования вырабатываемой мощности СБ.
6. Разработана статистическая модель работы СБ. Выведены уравнения, с помощью которых по измеренным в лабораторных условиях характеристикам СБ и справочным метеоданным можно оценить вырабатываемую мощность с погрешностью, не превышающую 5%.
7. На примере г. Томска спрогнозированы и определены наиболее оптимальные режимы работы СБ. Показано, что СБ в течение года способна собрать 160 кВт·час/м². Эти данные позволяют проектировать различные автономные устройства с питанием от СБ.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Козлов А.В, Ковалевский В.К., Юрченко А.В. Результаты климатических испытаний солнечной батареи в природных условиях г. Томска. // Светотехника №1 2005. 4 стр. стр 37-41
2. Белан Б.Д. Юрченко А.В. Козлов А.В, Пестунов Д.А. Влияние параметров атмосферы на энергетические характеристики кремниевой солнечной батареи. // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т.18. №8 С.731-734.
3. Козлов А.В, Юрченко А.В. Мобильная станция мониторинга работы солнечных батарей в природных условиях. // Датчик и системы №9, 2006. стр.64-67
4. Kozlov A.V, Yurchenko A.V., Kovalevskiy V.K. Analysis of the solar battery efficiency under the natural conditions in Tomsk. // Modern Techniques and Technologies. 9th International Scientific and Practical Conference of students, Post-graduates and Young Scientists. Proceedings 7-11 April, 2003 Tomsk, Russia. p. 16-18
5. Козлов А.В, Белан Б.Д. Юрченко А.В. Результаты пятилетних климатических испытаний солнечной батареи в природных условиях г.Томска. // 2003 Материалы 2 Всероссийской конференции молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии». С.284-286.
6. Козлов А.В, Ковалевский В.К., Юрченко А.В. Результаты климатических испытаний солнечной батареи в природных условиях г.Томска. // Возобновляемая энергетика. Состояние проблемы перспективы Международная конференция. СПб. 4-6 ноября. 2003 г. Материалы конференции. стр. 275-281
7. Козлов А.В, Ковалевский В.К., Юрченко А.В Многопараметровый мониторинг работы солнечной батареи в условиях Сибири. // Кремний 2004. Тезисы докладов Совещания. Иркутск, 5-9 июля 2004. стр.48-49
8. Козлов А.В, Юрченко А.В Юрченко В.А Солнечные батареи как объект инновационного развития изделий двойного назначения. // Материалы III международного технологического конгресса «Военная техника, вооружение и технологии двойного применения». Омск 7-10 июня 2005 г. Стр.331-332
9. Козлов А.В, Юрченко А.В. Проблемы мониторинга работы солнечных батарей в условиях Сибири и Дальнего Востока. // Материалы международного семинара «Альтернативные источники энергии и проблемы энергосбережения 30 мая –1 июня. Санкт-Петербург. 2005 г. стр.64-67.
10. Козлов А.В, Юрченко А.В. Экологические аспекты использования солнечных батарей в Сибири. // Материалы Российской конференции «Демидовские чтения» Томск 2006. стр. 234-238
11. Kozlov A.V, Yurchenko A.V., The results of the long-term environmental tests of silicon solar batteries in Siberia. // Proceedings of 21st European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Dresden 4-8 September 2006. pp.2436-2439
12. Kozlov A.V, Yurchenko A.V. The long-term prediction of silicon solar batteries functioning for any geographical region. // Proceedings of 22st European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Milan 3-7 September 2007 pp. 3019 - 3022
13. Kozlov A.V, Yurchenko A.V. The results of the long-term environmental tests of silicon solar batteries in Siberia Modern Techniques and Technologies. // Proceedings of 13th International Scientific and Practical Conference of students, Post-graduates and Young Scientists. Proceedings 26-30 March, 2007, Tomsk, Russia. p. 20-22
14. Yurchenko A., Kozlov A, Volkov A. Climatic and hardware factors influencing the output performances of silicon modules in Siberia and the far east conditions // Proceedings of 23st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, 4-8 September 2008. pp. 2989 – 2991.
15. Козлов А. В., Копылов В.В., Волков А.В., Юрченко А.В. Использование солнечных фотоэлектрических станций для электроснабжения автономных потребителей в условиях приморского края. // Материалы XIV

Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ 2008. Томск, ТПУ, 24-28 марта 2008 г. 217 – 218 стр.

16. Козлов А.В., Юрченко А.В., Пестунов Д.А. Мобильная станция мониторинга работы солнечной батареи. Патент на полезную модель №75516. Опубликовано 10.08.2008. Бюллетень №22.

