

## Технико-экономические аспекты сетевой солнечной энергетики в России

© А.В. Бобыль,<sup>1</sup> С.В. Киселева,<sup>2</sup> В.Д. Кочаков,<sup>3</sup> Д.Л. Орехов,<sup>4</sup> А.Б. Тарасенко,<sup>5</sup> Е.Е. Терукова<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.И. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Научно-исследовательская лаборатория возобновляемых источников энергии географического факультета  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,  
119991 Москва, Россия

<sup>3</sup> Чебоксарский государственный университет им. Н.И. Ульянова  
428015 Чебоксары, Россия

<sup>4</sup> ООО „НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике“ при ФТИ им. А.Ф. Иоффе,  
194064 Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup> Объединенный институт высоких температур РАН,  
125412 Москва, Россия

e-mail: a.b.tarasenko@gmail.com

(Поступило в Редакцию 22 августа 2013 г.)

Рассмотрены результаты работ по разработке, монтажу и испытаниям сетевой фотоэлектрической станции на основе тонкопленочных фотоэлектрических модулей тандемного типа пиковой мощностью 2 kW. Описаны подходы и методы расчета станций такого рода, рассматриваются механизмы возможной окупаемости станций и технических аспектов строительства подобных объектов. Также рассматриваются возможные роль и место накопителей электрической энергии в составе сетевых солнечных энергоустановок.

### Введение

Фотоэлектрические системы получили достаточно широкое распространение за рубежом в последние 20 лет [1]. Особенно впечатляют результаты, достигнутые в некоторых странах за последние 5–10 лет — введение специальных тарифов на закупку энергии в сеть привело к настоящему буму строительства как крупных солнечных электростанций мощностью в сотни мегаватт, так и относительно маломощных солнечных батарей в миллионах домохозяйств, что позволило таким странам, как Германия и США, фактически превратить солнечную энергетику в новую отрасль промышленности. Все фотоэлектрические системы можно условно разделить на два типа — с накопителем электрической энергии и без него. Причем необязательно система с накопителем является полностью автономной — она может служить источником аварийного питания потребителя в схеме параллельной работы с централизованной сетью.

Ситуация в России существенно отличается от европейской, хотя предпосылки для развития солнечной генерации есть и здесь — большое количество автономных потребителей, использующих дорогую электроэнергию от генераторов на ископаемом топливе (преимущественно дизельном), и нарастающие проблемы в электросетевом хозяйстве страны, оборачивающиеся для потребителя частыми отключениями, низким качеством электроэнергии, высокой платой за подключение к сетям. Основным препятствием для широкого внедрения солнечной энергетики является отсутствие стимулирующих мер для населения и промышленных потребителей, характерных для Европы, США и Япо-

нии и, как следствие, высокие капитальные затраты, полностью ложащиеся на плечи потребителя. Другой существенной проблемой является невозможность подключать к сетям генерирующие объекты малой мощности (до 5 MW), не включенные в генеральную схему развития энергосистемы страны и не квалифицированные как генераторы электрической энергии. В таком случае потребитель, даже решившийся на установку солнечной электростанции, не может использовать централизованную сеть как своеобразный виртуальный накопитель энергии бесконечной емкости и вынужден включать накопители в состав станции, что, вместе с согласующими силовыми электронными устройствами, увеличивает стоимость станции в 2–3 раза. Есть и объективные проблемы — климатические наблюдения показывают, что для России характерна существенная разница интенсивности солнечной радиации в летний и зимний периоды, что неминуемо сказывается на выработке солнечных станций. Только часть территории страны — хотя и не малая — обладает перспективным для освоения солнечным энергетическим потенциалом [2]. Отсутствие спроса на решения солнечной энергетики затрудняет развитие отечественного производителя и снижает интерес к оптовым поставкам у зарубежного, что также ведет к повышению затрат для конечного потребителя.

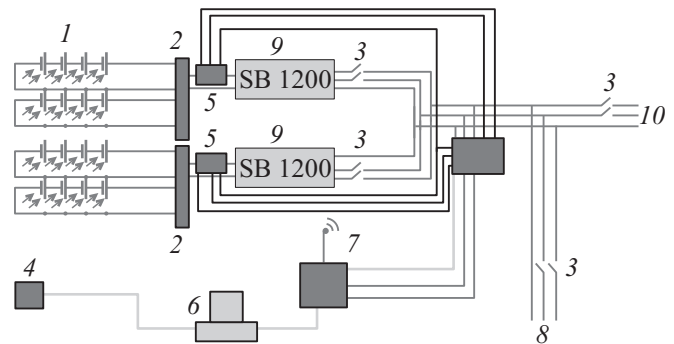
Вместе с тем анализ показывает, что солнечная энергетика может не только эффективно решать проблемы энергоснабжения изолированных территорий за счет сокращения потребления дизельного топлива, но и использоваться для выработки энергии в сеть в южных и

восточных регионах страны, не обладающих существенными собственными традиционными генерирующими мощностями [3].

В настоящее время ситуация в России начинает меняться — Правительством готовятся законодательные акты, стимулирующие применение возобновляемых источников энергии, правда, только для крупных генерирующих объектов [4]. ОАО „Роснано“ финансирует два крупных проекта в области солнечной энергетики — строительство завода по производству поликристаллического кремния солнечного качества в Усолье-Сибирском (Иркутская обл.) и производства тонкопленочных фотоэлектрических модулей тандемного типа в г. Новочебоксарск (Республика Чувашия). Для апробации возможных технических решений и получения экспериментальных данных о функционировании сетевых фотоэлектрических систем в рамках работ по Государственному контракту между Министерством образования и науки РФ и Физико-техническим институтом им. А.И. Иоффе РАН было принято решение о создании опытного образца 2 kW-ной сетевой фотоэлектрической станции в Чебоксарском государственном университете, снабженной комплексом измерительного оборудования, обеспечивающим сбор данных о погодных условиях и рабочих параметрах станции. Место расположения установки определяется двумя факторами — уровнем инсоляции и близостью производства фотоэлектрических модулей (университет готовит для него кадры и установка может быть использована в учебном процессе).

## 1. Схема установки и состав оборудования

Существенным этапом создания установки является оптимизация ее состава и структуры. Для обеспечения максимальной выработки электроэнергии в данном случае использованы инверторы с алгоритмом контроля точки максимальной мощности (КТММ) фотоэлектрических модулей и расположение модулей с наклоном к горизонту, равном  $41^\circ$ . Этот выбор обоснован в ходе расчета выработки станции для различных углов наклона модулей к горизонту. Применение специальных устройств слежения за Солнцем (треккеров) в данном случае ограничено по экономическим причинам и из-за повышенных массогабаритных характеристик модулей (обычно трекеры применяются совместно с компактными дорогостоящими фотоэлектрическими модулями с высоким КПД и системами концентрации солнечного излучения — в этом случае доля стоимости треккера в общей стоимости установки существенно уменьшается при заметном повышении выработки) [5]. Кроме того, электромеханические поворотные устройства треккера снижают надежность работы энергоустановки в целом. Алгоритмами КТММ снабжено большинство современных инверторов и контроллеров заряда. В общем случае этот алгоритм (а точнее, его разновидности) позволяет



**Рис. 1.** Блок-схема сетевой солнечной энергоустановки пиковой мощностью 2 kW: 1 — фотоэлектрические модули (16 штук), 2 — коммутационные коробки, 3 — автоматические выключатели, 4 — метеостанция, 5 — датчики тока Т201, 6 — компьютер, 7 — модуль сбора данных, 8 — сеть, 9 — сетевые инверторы SunnyBoy, 10 — нагрузка.

снизить ток в цепи солнечной батареи при снижении напряжения вследствие неблагоприятных погодных условий и тем самым избежать „сваливания“ солнечной батареи в зону тока короткого замыкания с резким падением выработки, что возможно, например, при попытке зарядить от фотоэлектрического модуля сильно разряженный аккумулятор [6].

Функциональная блок-схема установки представлена на рис. 1. Для комплектации установки выбраны сетевые инверторы SunnyBoy 1200 одни из лучших в своем классе.

При разработке энергоустановки было необходимо принять во внимание некоторые особенности тонкопленочных фотоэлектрических модулей тандемного типа (ТПФМ ТТ), а именно повышенное рабочее напряжение (55 V) и напряжение холостого хода (74 V) и пониженное значение рабочего тока и тока короткого замыкания относительно кристаллических модулей близкой мощности. Кроме того, у ТПФМ ТТ последних поколений отсутствует обрамляющая модуль алюминиевая рамка, служащая ключевым элементом для крепления модуля на опорную конструкцию. Параметры ТПФМ ТТ PramacLuceP7LM, использованного в установке и близкого по мощности мультикристаллического модуля RZMP-130T (ОАО „Рязанский завод металлокерамических приборов“) приведены в табл. 1.

Вследствие отсутствия рамки крепление модуля осуществляется специальными крюками, размещенными на его тыльной стороне. Крюки крепятся к тыльному стеклу модуля специальным клеевым составом. Такой подход несколько необычен для процедуры монтажа модуля, требует проверки устойчивости клеевого состава в условиях российских зим, но позволяет несколько увеличить КПД модуля за счет более полного использования площади фронтальной поверхности. Повышенное напряжение модуля не позволяет полностью использовать возможности инвертора по преобразуемой мощности — максимально допустимое количество модулей

**Таблица 1.** Характеристики тонкопленочных фотоэлектрических модулей тандемного типа, использованных в установке

Параметр	Pramac Luce P7LM	RZMP-130T
Пиковая мощность, W	125	126
Габариты, mm	1300×1100×31	1490×670×35
Масса, kg	26	14.6
Напряжение холостого хода, V	74	21
Напряжение при максимальной мощности, V	55	17
Ток при максимальной мощности, A	1.3	8.1
Ток короткого замыкания, A	1.56	8.5

в линейке составляет 4 шт., что соответствует 520 W электрической мощности, хотя запас по рабочему току еще остается. Поэтому две параллельные цепочки модулей присоединяются к каждому инвертору через специальную коммутационную коробку, минимизирующую их взаимное влияние и повышающую безопасность эксплуатации установки.

Установка снабжена системой сбора данных, контролирующей ток на каждом из инверторов и мощность, выдаваемую в сеть. Кроме того, отслеживается текущее значение интенсивности солнечной радиации, датчик которой смонтирован на опорной конструкции под тем же углом наклона к горизонту, что и фотоэлектрические модули, что позволяет производить количественные оценки эффективности преобразования солнечной энергии на установке. В настоящее время установка доукомплектована двумя интеллектуальными счетчиками „Меркурий“, обеспечивающими дистанционный мониторинг линии нагрузки и солнечных батарей с выдачей данных в сеть Интернет. Нагрузкой для установки служит оборудование учебного класса ЧГУ. Излишки сбрасываются в электрическую сеть университета. В ходе реализации проекта установка получила условное обозначение СЭУ-С-2 (солнечная энергоустановка сетевая пиковой мощностью 2 kW).

## 2. Расчет выработки электрической энергии СЭУ-С-2

Прогнозирование выработки энергии сетевой или автономной фотоэлектрической станции является наряду с учетом капитальных затрат одной из важнейших составляющих оценки экономической целесообразности строительства фотоэлектрических станций. Основой для подобных оценок служат результаты многолетних климатических наблюдений, однако в настоящее время покрытие территории России сетью наземных метеостанций недостаточно для получения адекватной информации о приходе солнечной радиации в любой точке территории

страны. Такую возможность может обеспечить спутниковая база данных NASA SSE [7], на основе которой разработаны отечественная геоинформационная система и база данных по возобновляемым энергоресурсам [8]. Главным достоинством ВД NASA является свободный доступ к массиву специализированных климатических данных, географически привязанных к сетке  $1 \times 1^\circ$ , которые получены путем математического моделирования процесса распространения солнечной радиации в атмосфере Земли. При этом фактическую основу модели составляют данные многолетнего спутникового мониторинга характеристик атмосферы, падающей и отраженной радиации на верхней границе атмосферы, альbedo земной поверхности и ряда других параметров. Выдаваемые данные включают в себя усредненные удельные значения падающей солнечной радиации на поверхность, наклоненную под различными углами к горизонту, количество бессолнечных дней для разных углов наклона этой поверхности, продолжительность светового дня, время восхода Солнца, индекс прозрачности атмосферы, характеризующий долю диффузной солнечной радиации, и ряд других важных параметров. Специалистами МГУ им. М.В. Ломоносова и Объединенного института высоких температур РАН в процессе работы над Атласом возобновляемых энергоресурсов России [2] и Геоинформационной системой „Возобновляемые источники энергии“ (ГИС ВИЭ) [8] проведена большая работа по верификации спутниковых данных по многолетним наблюдениям наземных метеостанций.

Поскольку при прогнозных расчетах выработки энергии использовались данные NASA [7], объективно необходимым стало проведение верификации этих данных для условий Чебоксар. В регионе имеется только 3 актинометрические станции, ведущие непрерывные многолетние измерения энергетических характеристик падающей солнечной радиации, причем ближайшей к Чебоксарам является станция в Нижнем Новгороде [9]. Небольшое расстояние между городами (порядка 240 km) одинаковая широта точек ( $56^\circ$  с.ш.) позволяет провести сравнения по данным нижегородской актинометрической станции. Результаты для падающей суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность и прямой радиации на нормальную к лучу поверхность приведены на рис. 2.

Видно, что данные NASA по суммарной радиации, которые и использовались при прогнозных оценках выработки электроэнергии, весьма точно соответствуют наземным измерениям (отклонения в максимуме составляют 5% от величины). Отклонения значений прямой радиации значительно больше (в максимуме до 75%), причем спутниковые данные превышают наземные в течение всего года. Последние из приведенных результатов могут играть существенную роль в случае, если расчеты проводятся для системы, предполагающей ту или иную систему слежения за Солнцем, либо использование опорной конструкции с ненулевым углом наклона к горизонту. Полагая адекватными данные NASA

по суммарной солнечной радиации, следует принять во внимание вариации этой величины при различной ориентации приемной поверхности (табл. 2, рис. 3).

Угол наклона поверхности в  $41^\circ$  (широта места —  $15^\circ$ ) обеспечивает максимальный приход суммарной радиации, уступая только в летние месяцы горизонтальной ориентации поверхности и в течение всего года так называемому оптимальному углу наклона — определенному для каждого месяца, и предполагающего изменение угла наклона плоскости ФЭП по крайней мере один раз в месяц, что не предусматривалось в данной системе.

Для расчета выработки энергии СЭУ-С-2 использовалась следующая схема: предполагалось, что вся выработанная фотоэлектрическими модулями электрическая энергия направляется в сеть посредством сетевых инверторов. Потери в кабелях пренебрегали в силу выбора специального кабеля солнечной серии сечением  $6 \text{ mm}^2$  и максимально возможного снижения протяженности линий постоянного тока. Соответственно выработанная за день энергия оценивалась как

$$W_{\text{prd}}^t (\text{kWh}) = \frac{L \left( \frac{\text{kWh}}{\text{sq.m day}} \right) \eta_1 (\%) \eta_2 (\%) S_{\text{mod}} (\text{sq.m}) N_{\text{mod}} (\text{unit})}{10000}, \quad (1)$$

где  $W_{\text{prd}}^t (\text{kWh})$  — выработанная станцией за сутки расчетная средняя энергия,  $L \left( \frac{\text{kWh}}{\text{sq.m day}} \right)$  — усредненное для каждого месяца суточное удельное значение падающей солнечной радиации,  $\eta_1 (\%)$  — КПД фотоэлектрического модуля,  $\eta_2 (\%)$  — КПД сетевого инвертора напряжения,  $S_{\text{mod}} (\text{sq.m})$  — площадь фотоэлектрического модуля,  $N_{\text{mod}} (\text{unit})$  — количество модулей в составе станции.

Несмотря на то, что в БД NASA SSE указаны суточные суммы падающей солнечной радиации, усреднение ведется за месяц, поэтому для сравнения результатов теоретических расчетов и экспериментальных исследований целесообразно сравнивать месячные суммы солнечной радиации и выработанной энергии

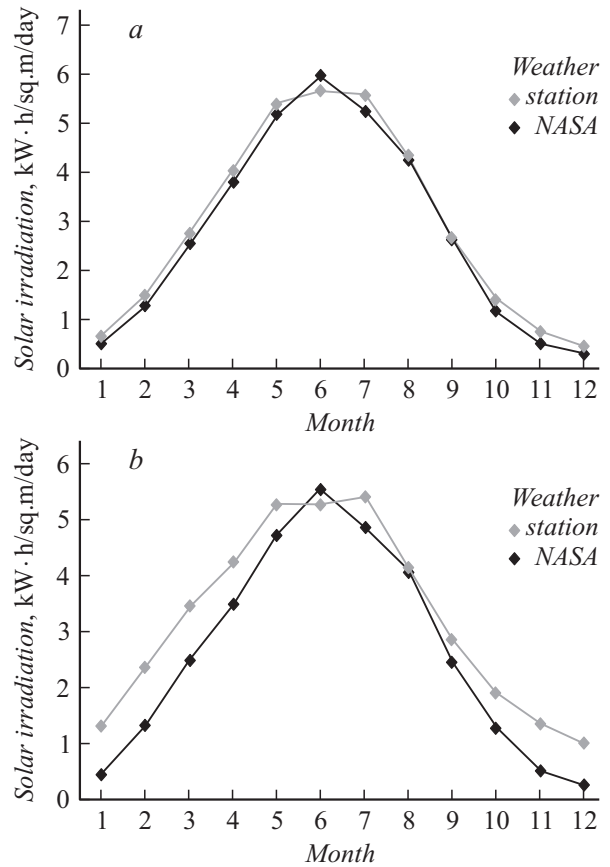
$$W_{\text{prm}}^t (\text{kWh}) = W_{\text{prd}}^d (\text{kWh}) (N_d - N_{bd}), \quad (2)$$

где  $W_{\text{prm}}^t (\text{kWh})$  — выработанная станцией за месяц расчетная средняя энергия,  $N_d$  — количество дней в месяце,  $N_{bd}$  — количество бессолнечных дней в месяце, усредненное по месяцу. Это значение имеет смысл сравнивать с суммарной энергией, реально выработанной станцией за месяц

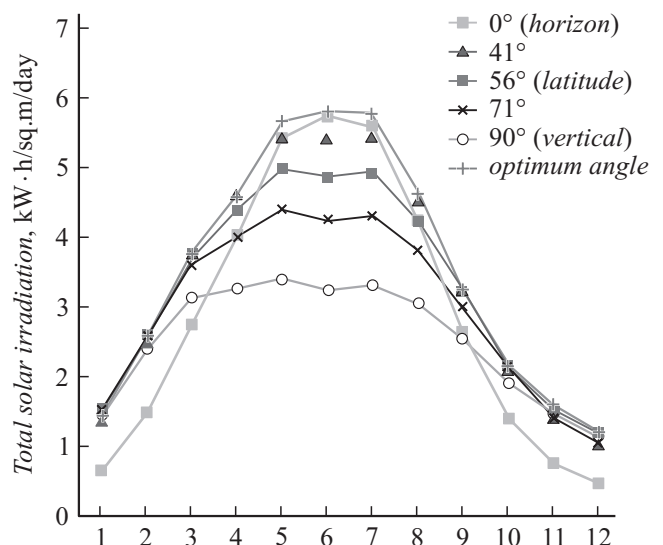
$$W_{\text{prm}}^{\text{ex}} (\text{kWh}) = \sum W_{\text{prd}}^{\text{ex}} (\text{kWh}). \quad (3)$$

Здесь суммирование ведется по всем суткам месяца.

Пиковая мощность станции принимается равной минимальному из значений суммарной пиковой мощности фотоэлектрических модулей и суммарной пиковой мощности сетевых инверторов напряжения — ясно, что при превышении второй произойдет аварийная остановка станции.



**Рис. 2.** Результаты сравнения данных метеорологических наблюдений (weather station) и данных БД NASA SSE. Приведены суммы суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность (a) и суммы прямой солнечной радиации на нормальную к лучу поверхность (b), а также среднемесячные значения суточных сумм.



**Рис. 3.** Внутригодовое изменение суммарной солнечной радиации (среднемесячные значения суточных сумм) в зависимости от угла наклона принимающей поверхности.

**Таблица 2.** Величина суммарной солнечной радиации, падающей на различным образом ориентированные поверхности, по данным NASA SSE [7], kWh/sq.m./day

Наклон	Месяцы года											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0° (горизонт)	0.66	1.48	2.74	4.03	5.41	5.73	5.59	4.25	2.64	1.41	0.76	0.46
41°	1.34	2.45	3.71	4.57	5.41	5.38	5.43	4.51	3.25	2.09	1.40	1.03
56° (широта)	1.47	2.58	3.73	4.38	4.96	4.86	4.92	4.24	3.20	2.16	1.52	1.15
71°	1.52	2.58	3.58	3.98	4.38	4.24	4.31	3.81	3.00	2.12	1.55	1.20
90° (вертикаль)	1.46	2.39	3.13	3.26	3.40	3.24	3.30	3.05	2.55	1.92	1.47	1.17
Оптимальный угол	1.52	2.60	3.75	4.59	5.65	5.80	5.76	4.59	3.26	2.16	1.55	1.21
Величина оптимального угла	72.0	64.0	51.0	35.0	20.0	11.0	17.0	27.0	43.0	58.0	69.0	75.0

### 3. Результаты прогнозных оценок и мониторинга работы энергоустановки

Оценка капитальных затрат производилась на основе схемы, приведенной на рис. 1. Суммировались стоимости всех компонентов станции. По результатам ранее выполненных оценок проектов [10] затраты на строительные-монтажные работы оценивались в 30% от суммарной стоимости комплектующих, затраты на непредвиденные расходы — в 5% от той же суммы.

В настоящее время Правительством РФ ведется разработка комплекса мер по стимулированию внедрения ВИЭ, включая солнечные электростанции, на основе договоров на покупку мощности. Однако окончательный облик этих мер и методики расчета пока неясны. Неясно также, будет ли учитываться в расчетах коэффициент использования установленной мощности — для некоторых периодов года для фотоэлектрических станций он может быть очень мал. Поэтому расчет простой окупаемости станции производился на основе механизма тарифа на покупку энергии от солнечной станции в сеть. Требуемый тариф определялся как отношение капитальных затрат к заданному сроку окупаемости. Подразумевается, что часть вырабатываемой электрической энергии продается в сеть, а часть используется на собственные нужды оператора станции. Соотношение этих долей также является переменной величиной.

Запуск энергоустановки СЭУ-С-2 в опытную эксплуатацию состоялся в конце сентября 2012 г. С середины декабря 2012 г. по середину января 2013 г. станция простаивала из-за необходимости устранения крупной аварии в системе сбора данных (вышел из строя модуль накопления данных). Таким образом, для сравнения с результатами расчетов могут быть представлены экспериментальные данные за октябрь—ноябрь 2012 г. и за февраль—март 2013 г., поэтому сравнение целесообразно вести именно по этим месяцам. Данные о расчетной среднемесячной выработке электрической энергии пред-

ставлены в табл. 3 (для разных углов наклона модулей к горизонту). Из представленных результатов видно, что угол наклона, равный 41°, возможно, является наиболее оптимальным с точки зрения выработки энергии за год.

На рис. 4 представлены графики поступления солнечной энергии, измеренные штатным датчиком инсоляции СЭУ-С-2, и выработки энергии станцией для указанных выше месяцев. Суммирование экспериментальных данных и их сравнение с прогнозными (табл. 4) дает весьма малое значение ошибки для весенних месяцев и достаточно существенное для осенних.

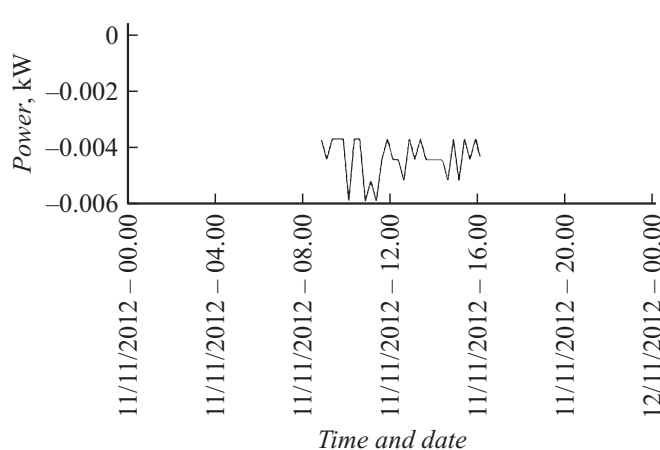
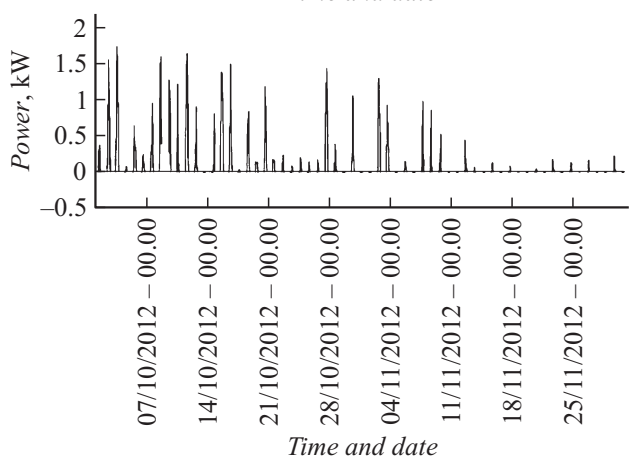
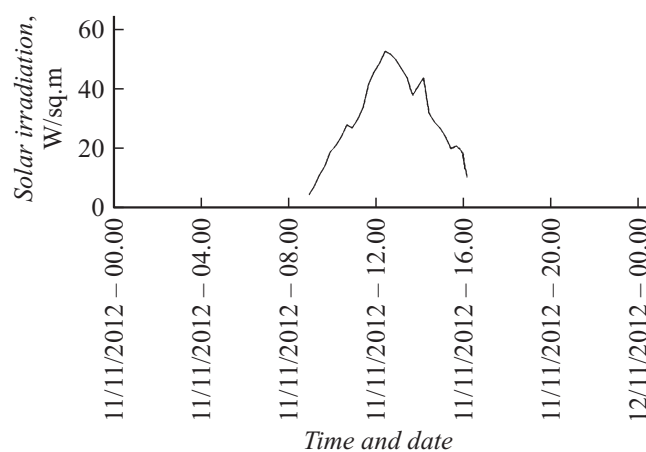
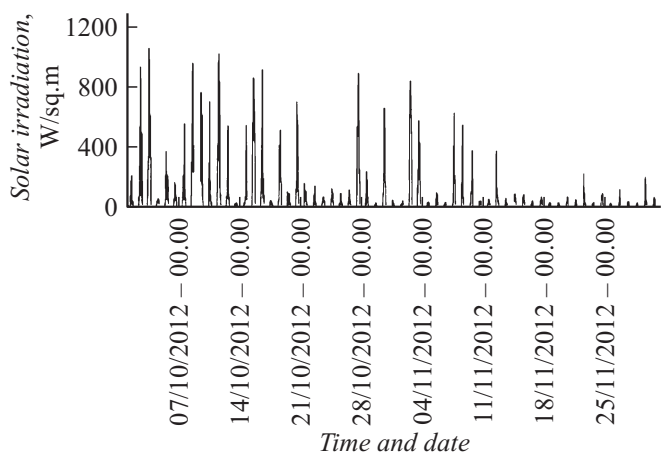
Это может быть обусловлено как отклонениями конкретного года от средних многолетних значений, так и недостаточным учетом особенностей работы оборудования, границами применимости используемых климатических баз данных, особенностями применяемых датчиков излучения в части их чувствительности к прямой и рассеянной составляющей. В то же время для более благоприятных погодных условий точность очень высока. Более детальные выводы могут быть сделаны

**Таблица 3.** Прогноз выработки энергии СЭУ-С-2 за год на основе климатических данных (kWh)

Месяц года	Угол наклона, deg		
	41	56	77
Январь	61	67	69
Февраль	94	100	100
Март	166	167	161
Апрель	216	207	189
Май	252	231	204
Июнь	234	211	184
Июль	263	238	209
Август	203	191	171
Сентябрь	144	142	133
Октябрь	84	87	86
Ноябрь	62	68	69
Декабрь	50	56	58
Итого за год	1831	1765	1631

**Таблица 4.** Сравнение расчетных и измеренных усредненных энергетических параметров СЭУ-С-2.

Месяц и год	Прогнозная усредненная инсоляция, kWh/sq.m/day	Измеренная усредненная инсоляция, kWh/sq.m/day	Прогнозная выработка электроэнергии СЭУ-С-2, kWh	Измеренная выработка электроэнергии СЭУ-С-2, kWh
Октябрь 2012	2.11	1.5	84	68.7
Ноябрь 2012	1.4	0.41	62	14
Февраль 2013	2.39	2.43	94	97
Март 2013	3.66	3.7	166	169

**Рис. 4.** Поступление солнечной энергии и выработка электрической энергии СЭУ-С-2 за октябрь–ноябрь 2012 г.**Рис. 5.** Особенности работы СЭУ-С-2 в условиях низкой солнечной радиации.

только после завершения годичного мониторинга работы станции. Ситуация с выработкой энергии в ноябре усугубляется также особенностями работы инверторов: при мощности модуля менее 25 W КПД инвертора резко падает, и иногда работа станции прекращается даже в условиях наличия малой, но не нулевой инсоляции, что не учитывается расчетной моделью, оперирующей данными, усредненными по месяцу. Таким образом, отдельного исследования заслуживает как работа самих фотоэлектрических модулей, так и всего блока генерации из модулей и инверторов при пониженной инсоляции (рис. 5).

Результаты технико-экономических расчетов представлены в табл. 5. Тариф, по которому сетевая компания продает электроэнергию потребителю, принят равным 4 рубля за kWh. Эта величина используется при расчете станции в случае нулевого значения компенсационного тарифа — окупаемость может наступить только за счет отказа от закупки энергии из сети в пользу собственной солнечной генерации. В этом случае в графе „Срок окупаемости“ появляется не заданный срок, а срок простой окупаемости станции для данных условий (50.2 лет), что является запредельным значением с учетом сроков службы оборудования.

Таблица 5. Результаты оценки экономических показателей СЭУ-С-2

Срок простой окупаемости, лет	8	8	8	8	8	8	50.2	10	10	10	10	10	10
Доля энергии, продаваемой в сеть	0.2	0.4	0.5	0.8	0.8	1.0	0.0	0.2	0.4	0.5	0.8	0.8	1.0
Требуемая величина компенсационного тарифа, руб./kWh	109.5	56.7	46.2	32.1	30.4	25.1	0.0	84	44	36	25	24	20

#### 4. Накопители электрической энергии в составе сетевых солнечных энергоустановок

Одним из главных недостатков автономной установки с накопителем электрической энергии, как уже говорилось выше, являются повышенные капитальные затраты на ее создание за счет появления в схеме новых дорогостоящих компонентов — инвертора, контроллера заряда, аккумулятора (рис. 6).

Кроме того, роль его в сетевой установке не так очевидна, как в автономной — здесь излишки электрической энергии отправляются в сеть, а недостатки компенсируются оттуда же. Основным нюанс связан с особенностями работы сетевых инверторов напряжения: необходимым условием их работы является постоянный мониторинг частоты централизованной сети. При обращении частоты в нуль, например, при аварии в централизованной сети и ее отключении по соображениям безопасности (и отсутствию несущей частоты, по которой осуществляется синхронизация инвертора с сетью) инверторы автоматически выключаются [11]. Таким образом, даже при высоком уровне инсоляции расположенная на крыше дома станция может не обеспечить питание даже своего основного потребителя (продажа энергии в сеть в этом случае, разумеется, невозможна). Эта проблема имеет значение в первую очередь для тех потребителей, которые заинтересованы не столько в продаже энергии в сеть, сколько в ее

использовании на собственные нужды. Однако из табл. 4 следует, что при нынешней экономической ситуации такой сценарий является убыточным во многих случаях, за исключением тех, когда требуется подключение нового потребителя (или наращивание мощности старого сверх установленных лимитов) к централизованной сети в энергодефицитных районах. В этом случае плата за мощность при подключении может быть достаточно высока, чтобы резко увеличить капитальные затраты на традиционный вариант энергоснабжения и повысить привлекательность собственной генерации при высоком уровне инсоляции в регионе. Если к тому же сеть в регионе не обеспечивает должного качества электроэнергии и ее работа характеризуется частыми отключениями электроэнергии, то потребителю, решившемуся на создание собственной солнечной электростанции, жизненно необходим накопитель, причем не минимальных размеров, а достаточных для создания аварийного источника питания требуемой длительности работы с учетом ночного времени и бессолнечных дней. При этом во избежание поражения электрическим током оперативного персонала, работающего над устранением аварии в сети, должна быть полностью исключена выдача электрической мощности в сеть в те периоды, когда работает источник аварийного питания. Отдельное внимание также должно быть уделено соотношению мощностей сетевых и аккумуляторных инверторов во избежание выхода из строя дорогостоящего оборудования.

Сказанное выше в основном относится к домохозяйствам и другим малым потребителям, расположенным в зонах с нестабильной электрической сетью. Для крупных солнечных сетевых электростанций, основным назначением которых является выдача энергии в сеть, эта проблема актуальной не является — при аварии в сети станция обязана прекратить работу. Однако за рубежом, особенно в Японии, иногда практикуется применение накопителей на крупных генерирующих объектах на основе ВИЭ [12]. Основная задача, которая решается при этом, — регулирование частоты сети и поддержание качества электроэнергии на нужном уровне за счет компенсации флуктуаций выработки первичного источника энергии накопителем электрической энергии [13]. Как правило, большая энергоемкость накопителя (и, как следствие, большие капитальные затраты) для этих целей не требуются, но накопитель должен иметь высокую мощность как при заряде, так и при разряде. В Японии в этой нише широко используются натрий-серные

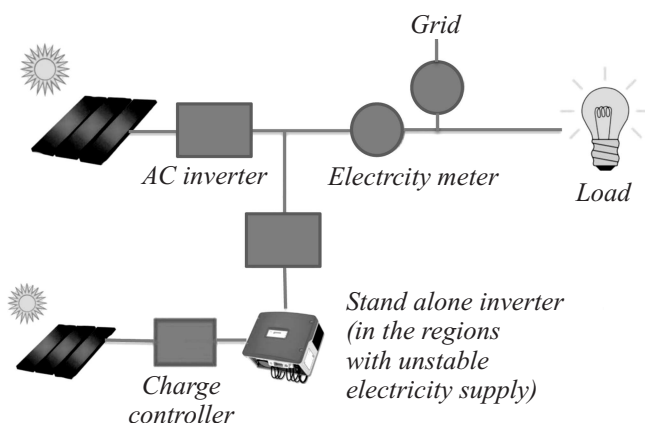


Рис. 6. Блок-схема солнечной сетевой энергоустановки с накопителем электрической энергии.

батарей, в целом делаются попытки применения и других систем — литий-ионных аккумуляторов, суперконденсаторов, водородного цикла, гидроаккумуляторов и накопителей энергии на основе сжатого воздуха [14]. Если же рассматривать вопрос накопления энергии на длительные периоды (более 1 h) при избыточной генерации ВИЭ и выдаче ее при провалах генерации, то для солнечных и ветровых электростанций с уровнем установленной мощности в десятки мегаватт наиболее экономически адекватным решением станет использование последних двух типов накопителей при условии, что они участвуют в регулировании работы не только конкретной электростанции на основе ВИЭ, но и сети всего региона [15].

## Заключение

В ходе выполнения работ по Государственному контракту № 16.526.12.6017 от 14.10.2011 г. была создана опытная сетевая энергоустановка СЭУ-С-2 мощностью 2 kW, отработаны типовые технические решения для установок такого класса, проведены ее испытания и фактически начата опытная эксплуатация. Важным достоинством данной установки является наличие в ее составе системы мониторинга, что позволяет получать информацию о рабочих параметрах установки и уровне инсоляции в течение заданных периодов, накапливать, систематизировать и обрабатывать полученную информацию. Реализация данного проекта является логическим продолжением работ ряда коллективов и организаций по созданию климатических баз данных и разработке методов проектирования солнечных энергоустановок и позволяет перейти от расчетно-аналитических к экспериментальным исследованиям в этой области. В ходе выполнения проекта был проведен предварительный расчет выработки энергии станцией, а в ходе испытаний — сравнение с экспериментальными данными по доступным периодам времени.

Сравнение показало хорошую точность прогнозов для весенних месяцев с высоким уровнем инсоляции и существенное снижение точности для осенних периодов. Также выявлен ряд особенностей работы фотоэлектрических модулей и согласующего электротехнического оборудования, что открывает широкий простор для дальнейших исследований и дает ценную информацию для совершенствования программных и схемных решений станций, расчетных методик, а также конструкции и технологии фотоэлектрических модулей. Тем не менее для получения более полного представления о работе станции необходимо выполнить по крайней мере годичный мониторинг ее работы.

В настоящей работе приведены некоторые технико-экономические оценки для разработанных технических решений, обосновывающие необходимость мер государственной поддержки для сетевой солнечной энергетики, рассмотрена целесообразность применения накопителей электрической энергии на сетевых солнечных электростанциях. Показано, что эта мера имеет смысл для

относительно малых станций, вырабатывающих преимущественно энергию для потребления на месте, а не для продажи в сеть. На крупных солнечных парках накопители могут использоваться только для решения узкого круга задач, связанных с повышением качества электрической энергии. Для более полной оценки конкурентоспособности решений солнечной энергетики по сравнению с подключением к централизованной сети, особенно для домохозяйств и малых предприятий в сельской местности, необходимо учитывать в расчетах стоимость подключения новых потребителей к сетям и состояние генерирующих и передающих мощностей в регионе возможного расположения установок.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ (Государственный контракт № 16.526.12.6017).

## Список литературы

- [1] Guojie L., Yuanzhang S., Qi W., San-Shing C., Si-Ye R. // Smart Grid Renewable Energy. 2010. N 1. P. 1–6.
- [2] Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Киселева С.В., Терехова Е.Н. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. М.: ОИВТ РАН, 2010. 85 с.
- [3] Фортон В.Е., Попель О.С. Энергетика в современном мире (монография). Долгопрудный: Издательский дом „Интеллект“, 2011. 165 с.
- [4] Распоряжение Правительства РФ от 8 января 2009 г. № 1-р, „Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 г.“
- [5] Шиняков Ю.А., Шурыгин Ю.А., Аржанов В.В., Теуцаков О.А., Осипов А.В., Аржанов К.В. // Изв. Том. политех. ун-та. 2012. Т. 320. № 4. С. 133–138.
- [6] Шиняков Ю.А., Шурыгин Ю.А., Аркатова О.Е. // Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. Докл. ТУСУР. Декабрь 2010. № 2 (22). Ч. 2. С. 102–107.
- [7] <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- [8] Гридасов М.В., Киселева С.В., Нефедова Л.В., Попель О.С., Фрид С.Е. // Теплоэнергетика. 2011. № 11. С. 38–45.
- [9] Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Ч. 1–6. Вып. 28. Л.: Гидрометеиздат, 1992.
- [10] Тарасенко А.Б., Киселева С.В., Попель О.С., Туттов В.Ф. // Альтернативная энергетика и экология. 2012. № 02 (106). С. 177–182.
- [11] <http://www.solarhome.ru/ru/rezerve/solargrid.htm>
- [12] Taku O., Masaharu K., Akiyasu O. // Intern. J. Appl. Ceram. Technol. 2004. Vol. 1. P. 269–276.
- [13] Leadbetter J., Swan L.G. // J. Power Sourc. 2012. N 216. P. 376–386.
- [14] Тарасенко А.Б. // Матер. VIII Всерос. научн. молодежной шк. „Возобновляемые источники энергии“. М.: Университетская книга, 2012. С. 148–185.
- [15] Hossain J. // Energy policy. 1993. August. P. 868–874.