

## Особенности эксплуатации солнечной автономной гибридной энергоустановки в условиях Северо-Западного федерального округа

© Г.А. Иванов,<sup>1</sup> А.В. Бобыль,<sup>1</sup> Е.М. Ершенко,<sup>1</sup> Е.И. Теруков<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,  
197376 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: genychchgu1@rambler.ru

(Поступило в Редакцию 12 марта 2014 г.)

Рассмотрены подходы и методы расчета солнечной автономной гибридной электростанции на основе тонкопленочных фотоэлектрических модулей тандемного типа пиковой мощностью 15 kW в условиях Северо-Западного федерального округа и приведены результаты работ по разработке, монтажу и испытаниям. Проведен анализ результатов прогнозируемой оценки выработки электроэнергии и мониторинга. Прогнозируемая величина выработки электроэнергии станцией за расчетный период (12.2012–09.2013) составляет 7.2 MWh, выработка по данным мониторинга — 5.9 MWh. Также произведен анализ факторов, которые могли повлиять на это различие. Потери выработки электроэнергии связаны с погрешностью методик расчета поступления солнечного излучения, с неточной согласованностью части оборудования и нагрузки, с потерями на преобразования.

### Введение

По подсчетам Министерства энергетики Российской Федерации 70% территории нашего государства не охвачено централизованным электроснабжением [1]. Причина этого большая удаленность поселений, соответственно огромные затраты на подключение к централизованным сетям. Преимущественным источником энергии для таких поселений являются дизель-генераторные электростанции. Несмотря на малые капитальные затраты на создание таких электростанций, эксплуатационные расходы являются весьма существенными за счет большой доли транспортной составляющей, связанной со сложностью доставки топлива, смазки и запасных частей для дизель-генераторных установок в удаленные населенные пункты. Износ оборудования для большинства дизельных электростанций достиг уровня 80–90%. Требуется замена оборудования на современное с улучшенными технико-экономическими показателями и восстановление или строительство новых зданий. Из-за экономии топлива и денежных средств на его закупку зачастую ограничен отпуск электроэнергии потребителям: до 5 h в сутки летом и до 10 h зимой.

Основной целью развития систем энергоснабжения изолированных потребителей является надежное обеспечение энергией и создание условий для социально-экономического развития удаленных районов.

К числу важнейших направлений развития систем энергоснабжения изолированных потребителей, обеспечивающих повышение качества и экономической эффективности электроснабжения за счет снижения потребления топлива наряду с реконструкцией, относятся следующие:

- подключение к системе централизованного электроснабжения,

- применение возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Подключение к системам централизованного электроснабжения поселений с нагрузкой до 3 MW экономически обосновано при условии сохранения цен на дизельное топливо, и если расстояние до центральных сетей будет не больше 90 km [2].

Для более удаленных местностей применение ВИЭ даст более привлекательные технико-экономические показатели. Одним из самых перспективных направлений ВИЭ является использование энергии Солнца.

По данным Института энергетической стратегии, теоретический потенциал солнечной энергетики в России составляет более 2300 billion tonne of oil equivalent (ТОЕ), экономический потенциал — 12.5 million ТОЕ. Потенциал солнечной энергии, поступающей на территорию России в течение трех дней, превышает энергию всего годового производства электроэнергии в нашей стране [3].

Развитие ВИЭ в Российской Федерации несомненно будет способствовать решению проблемы энергетической безопасности страны, социальных проблем, развитию бизнеса, повышению качества жизни населения. Однако доля электроэнергии, вырабатываемой в России с использованием ВИЭ, составляет около 1%. Сейчас ситуация в России начинает меняться — правительством готовятся законодательные акты, стимулирующие применение ВИЭ, 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 Новочебоксарске (Республика Чувашия).

Таблица 1. Поступление солнечного излучения на ориентированные поверхности

Город, угол наклона панелей	Среднесуточное поступление солнечного излучения, kWh/m <sup>2</sup> /day												Среднесуточное в течение года, kWh/m <sup>2</sup> /day
	Месяц года												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Санкт-Петербург, 44°	0.96	2.14	3.44	4.54	5.26	5.31	5.17	4.57	3.32	2.06	1.27	0.7	3.23
Калининград, 39°	1.22	2.05	3.19	3.92	5.05	4.86	4.79	4.58	3.34	2.12	1.19	1.08	3.12
Архангельск, 49°	0.52	1.47	2.99	4.45	4.75	5.36	5.11	3.97	2.96	1.65	0.82	0.1	2.85
Вологда, 44°	0.99	2.1	3.38	4.48	5.17	5.22	5.13	4.3	2.01	1.92	1.17	0.73	3.13
Мурманск, 53°	0.05	1.08	2.81	4.5	4.86	4.71	4.3	3.75	2.66	1.39	0.1	0.01	2.18
Петрозаводск, 46°	0.76	1.92	3.27	4.57	5.15	5.44	5.12	4.4	3.05	1.82	1.01	0.5	3.08
Сыктывкар, 46°	0.83	2.04	3.43	4.68	4.94	5.3	5.31	3.99	2.85	1.71	1.15	0.61	3.07
Великий Новгород, 43°	1.11	2.2	3.47	4.42	5.15	5.08	5.08	4.49	3.18	1.98	1.25	0.69	3.18
Псков, 42°	1.15	2.24	3.49	4.47	5.21	5.1	5.1	4.6	3.23	2.04	1.26	0.74	3.22
Нарьян-Мар, 52°	0.09	1.01	2.67	4.31	5.15	5.17	5.02	3.83	2.84	1.57	0.63	0.01	2.7

Для апробации возможных технических решений и получения экспериментальных данных о функционировании автономных гибридных фотоэлектрических систем в рамках работ по государственному контракту между Министерством образования и науки РФ и Физико-техническим институтом им. А.Ф. Иоффе было принято решение о создании опытного образца пиковой мощностью 15 kW.

Для систем, которые не предусматривают изменения угла наклона фотоэлектрического модуля (ФЭМ), принято считать, что максимальная выработка электроэнергии в течение года будет достигнута при расположении

модулей под углом (широта местности — 15°). Анализ солнечного излучения (по данным NASA) на ориентированную поверхность под этим углом (широта местности — 15°) в Северо-Западном федеральном округе (СЗФО) показал, что наиболее перспективные направления для расположения солнечной автономной энергоустановки: северо-запад (Санкт-Петербург, Петрозаводск, Калининград), юго-восток (Сыктывкар), юго-запад (Великий Новгород, Псков, Вологда). Поступление солнечного излучения в выбранных городах в течение 1 года представлены на рис. 1.

В табл. 1 показаны все сводные данные по поступлению солнечного излучения по всем административным центрам СЗФО, включая выбранные.

Из таблицы видно, что в указанных выше городах среднесуточный поток солнечного излучения преобладает и практически одинаков, поэтому размещение энергоустановки в Санкт-Петербурге позволит производить оценку энергоэффективности для всего СЗФО.

## Схема энергоустановки и состав оборудования

Функциональная схема автономной гибридной энергоустановки (АГЭУ) представлена на рис. 2. АГЭУ состоит из следующих основных узлов: фотоэлектрические модули 1, дизель-генератор 6, сетевые инверторы 2, автономные инверторы напряжения 4, аккумуляторные батареи 9, блок контроля 8, общая шина 3, шина аккумуляторных батарей 5, нагрузка 7.

ФЭМ представляет собой тонкопленочный фотоэлектрический преобразователь tandemного типа на основе аморфного и микрокристаллического кремния. Основные параметры ФЭМ представлены в табл. 2.

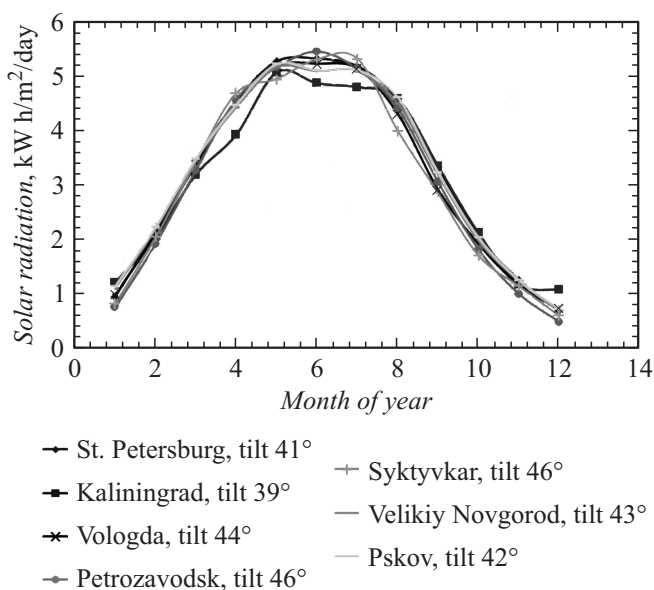
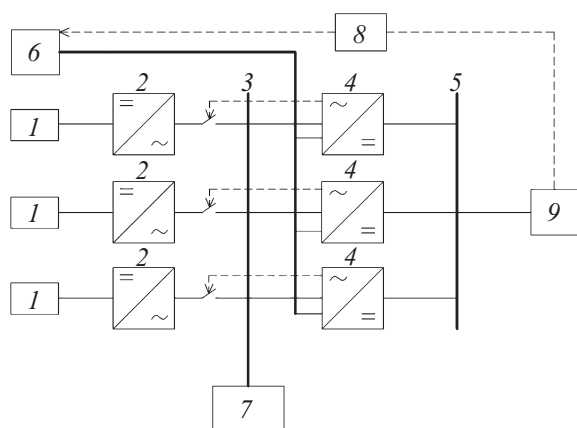


Рис. 1. Поступление солнечного излучения на ориентированные солнечные модули в течение года в разных городах СЗФО.



**Рис. 2.** Функциональная схема автономной гибридной энергоустановки пиковой мощностью 15 kW.

Энергоустановка состоит из 18 электрически соединенных между собой параллельно групп ФЭМ, каждая из которых содержит 4 модуля, соединенных последовательно. Преобразователи размещены под углом 44° в направлении на юг.

Крепление ФЭМ осуществляется на алюминиевые профили специальными крюками, расположенными на тыльной стороне модуля. Сами крюки крепятся клеевым составом.

Преобразование постоянного тока в переменный и контроль параметров в точке максимальной мощности (КТММ) выполняет группа из трех солнечных инверторов (СИ1–СИ3) Victron Blue Solar 4000 230. Один инвертор преобразует электроэнергию с 6 параллельных групп ФЭМ. Данные инверторы выдают фазное напряжение 220 В с частотой 50 Гц со сдвигом относительно времени 120°, при этом образуется трехфазная сеть с линейным напряжением 380°.

Преобразованное напряжение с выхода солнечного инвертора поступает на общую шину 3. К общей шине подключены автономные инверторы напряжения (АИН1–АИН3) Victron Multiplus 48/3000. На выход инвертора через шину 5 подключены аккумуляторные батареи (АКБ). На вход инверторов напрямую подклю-

чен дизель-генератор (ДГ). Данный инвертор является ключевым элементом всей энергоустановки и осуществляет следующие функции:

- задает частоту 50 Гц для функционирования солнечных инверторов,
- управляет зарядом/разрядом АКБ от ФЭМ и от ДГ,
- управляет пуском ДГ при разряженных АКБ и малой солнечной инсоляции, при этом отключая сетевые инверторы. Запуск ДГ осуществляется блоком контроля 8, который следит за напряжением на АКБ,
- при включенной нагрузке и дефиците энергии от ФЭМ инверторы подпитывают нагрузку от АКБ,
- при включенной нагрузке и профиците энергии от ФЭМ-инвертора заряжают АКБ.

Энергоемкость АКБ составляет 9,6 kWh. Учитывая, что свинцово-кислотные батареи требуют использование 20–25% от общей емкости, данные АКБ обладают небольшой энергоемкостью и их интенсивное использование в течение года привело к полному исчерпыванию ресурсов.

Нагрузкой 7 служат шесть галогенных ламп мощностью 1 kW каждая. Чтобы не перегружать систему, особенно не в солнечные дни, нагрузка работает в автоматическом режиме, следит за состоянием Солнца и напряжением на АКБ. Однако при всем этом необходимо сделать нагрузку многоступенчатой: уменьшить номинальные мощности каждой лампы и увеличить общую мощность.

Установка снабжена системой сбора данных, контролирующей ток на всех последовательно включенных групп ФЭМ, ток, напряжение и мощность на каждом из сетевых инверторов, напряжение АКБ, мощность нагрузки. Отслеживается текущее значение интенсивности солнечной радиации, датчик которой смонтирован на опорной конструкции под тем же углом наклона к горизонту, что и ФЭМ, что позволяет производить количественные оценки эффективности преобразования солнечной энергии на установке. Кроме того, система мониторинга следит за температурой окружающей среды и температурой одного ФЭМ, что позволяет провести более глубокий анализ эффективности самих ФЭМ.

**Таблица 2.** Параметры фотоэлектрических модулей

Параметр	Pramac Luce P7LM
Максимальная мощность, W	125
Габариты, mm	1300 × 1100 × 31
Масса, kg	26
Напряжение холостого хода, V	74
Напряжение при максимальной мощности, V	55
Ток при максимальной мощности, A	1.3
Ток короткого замыкания, A	1.56

## Расчет выработки электроэнергии и результаты прогнозных оценок и мониторинга работы энергоустановки

Прогнозирование поступления солнечного излучения и выработки энергии автономной фотоэлектрической станции является одной из важнейших задач для оценки экономической целесообразности строительства таких станций.

В настоящей работе для определения плотности энергии солнечного излучения в реальных условиях облачности по известным характеристикам излучения при чистом небе была выбрана методика Пейджа. Она строится на гипотезе о среднемесячных дневных профилях

плотности энергии прямого излучения в реальной атмосфере при чистом небе и предполагает использование наблюдаемых месячных солнечных излучений.

Для определения потоков солнечного излучения при чистом небе существуют следующие методики: методика Берда, методика Перинна, методика Янга, Хуанга и Тама, методика Геймарда (MLWT2), методика РЕСТ и др. Для всех этих методик известны среднеквадратические отклонения, которые были получены при сравнении расчетных параметров с данными, полученными при многолетнем наблюдении солнечного излучения на различных станциях. Минимальное расхождение расчетных значений с наблюдаемыми данными имеют методики Берда и Атвотера [5]. Кроме того, методика Берда позволяет учитывать все составляющие солнечного излучения и проста в использовании. Поэтому для расчета солнечного излучения при чистом небе для Санкт-Петербурга произведены по указанной методике. Для повышения точности расчета были использованы поправочные коэффициенты, которые действительны для территории России.

В качестве наблюдаемых месячных солнечных излучений была выбрана база метеорологических данных NASA SSE [6]. Главным достоинством БД NASA является свободный доступ к массиву специализированных климатических данных, географически привязанных к сетке  $1^\circ \times 1^\circ$ , 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, альбедо 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.

Для обеспечения максимального поступления солнечного излучения на ФЭМ необходимо регулярное изменение их угла наклона. Однако данная система не предусматривает такие вариации. Поэтому расчет проводился для выбранного угла расположения ФЭМ.

Расчет средней ожидаемой энерговыработки с учетом частичной затененности производился по следующей формуле:

$$W = L\eta_1\eta_2S_{NSmod}N_{mod}, \quad (1)$$

где  $W$  (kWh/day) — расчетная ожидаемая энерговыработка за сутки,  $L$  (kWh/m<sup>2</sup>/day) — усредненное для каждого месяца суточное удельное значение падающей солнечной радиации на ориентированную поверхность,  $\eta_1$  — номинальная эффективность преобразования ФЭМ солнечной энергии в электрическую,  $\eta_2$  — эффективность преобразования сетевого инвертора напряжения

(0.97),  $S_{NSmod}$  (m<sup>2</sup>) — площадь незатененной части ФЭМ, в каждый момент времени разный,  $N_{mod}$  — количество модулей в составе станции.

Расчетные и измеренные среднесуточные данные по поступлению солнечной энергии на ФЭМ за период с декабря 2012 г. по сентябрь 2013 г. приведены на рис. 3.

Расчетные и измеренные среднемесячные данные по выработке электроэнергии приведены на рис. 4.

Полученные данные внесены в сводную табл. 3.

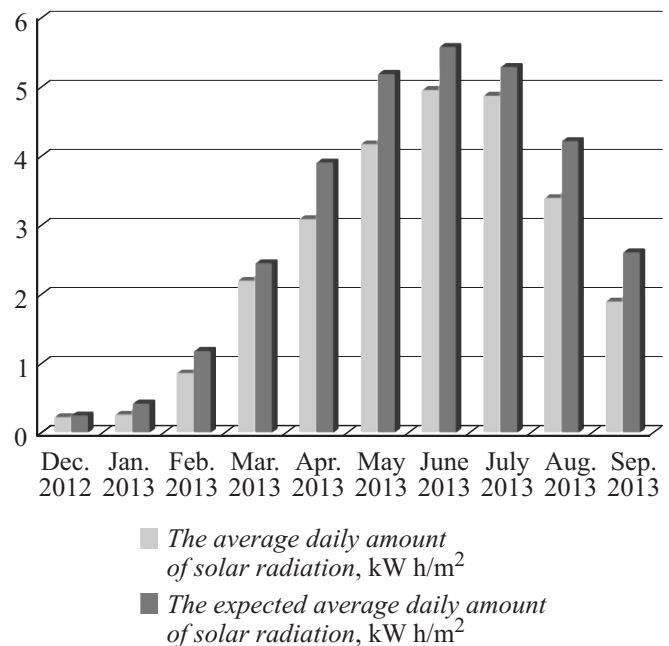


Рис. 3. Расчетные и измеренные среднесуточные данные по поступлению солнечной энергии.

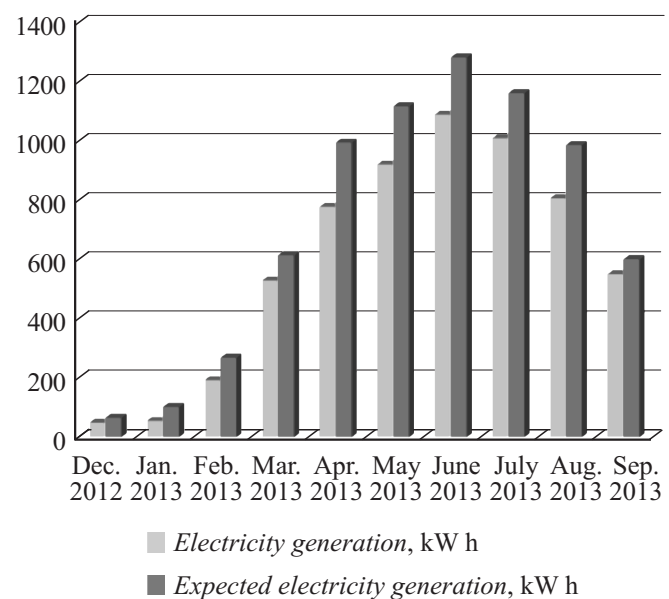


Рис. 4. Расчетные и измеренные среднемесячные данные по выработке электроэнергии.

**Таблица 3.** Сводная таблица рассчитанных и измеренных параметров солнечного излучения и выработки электроэнергии

Период	12.2012	01.2013	02.2013	03.2013	04.2013	05.2013	06.2013	07.2013	08.2013	09.2013
Ожидаемое среднесуточное поступление солнечной энергии на ориентированную поверхность, kWh/m <sup>2</sup>	0.26	0.43	1.19	2.46	3.92	5.2	5.59	5.3	4.23	2.62
Среднесуточное поступление солнечной энергии, kWh/m <sup>2</sup>	0.23	0.27	0.87	2.21	3.1	4.2	4.96	4.88	3.4	1.9
Ожидаемая среднемесячная выработка электроэнергии, kWh	68	104.6	270.6	615.8	995.3	1117.3	1282.4	1162	987	602
Среднемесячная выработка электроэнергии, kWh	50.6	53.4	194.3	529.8	778.3	920.5	1088	1009	806.5	550.9

Уровни средней измеренной выработки электроэнергии и поступления солнечной радиации на 10–50% отличаются от уровней прогнозируемых параметров. Отклонение могло быть вызвано следующими факторами:

— методики расчета прогнозируемых параметров не совершенны и имеют погрешности (8–10%),

— КПД фотоэлектрического преобразователя при расчетах принят равным КПД, измеренному при стандартных условиях — AM1.5, 25°C, 1000 W/m<sup>2</sup>. Реальные и стандартные условия эксплуатации установок различны как по плотности потока падающего солнечного излучения, так и по рабочей температуре ФЭМ,

— особенностями датчиков солнечного излучения в части их чувствительности к прямой и рассеянной составляющей. В то же время для более благоприятных погодных условий точность более высока,

— не точная согласованность части оборудования и нагрузки с пиковой мощностью ФЭМ, что вызывало в некоторых случаях отключение части сетевых инверторов (20%),

— потери на преобразование постоянного тока в переменный. КПД сетевого инвертора не статично и зависит от мощности, которую она в данный момент преобразует (3–12%). Например, при небольшой освещенности работа инвертора может прекратиться,

— загрязнение, наледь, изморозь ФЭМ (5%),

— потери на проводах и в местах соединений (2%) [7].

Таким образом, более детального анализа требует работа самих ФЭМ, отдельно взятое оборудование энергоустановки и вся система в целом.

## Заключение

Созданная автономная энергоустановка мощностью 15 kW позволила отработать типовые технические решения солнечных автономных электростанций, что в свою очередь стало основополагающим фактором при проектировании станции с аналогичной архитектурой мощностью 100 kW в с. Яйлю Республики Алтай [8].

Наличие в составе установки системы мониторинга дало возможность получать, накапливать и обрабатывать информацию по всем ключевым параметрам. Были проведены теоретические расчеты поступления солнечного излучения и выработки электроэнергии. В ходе испытания энергоустановки были получены экспериментальные данные и результаты сравнения с расчетными показателями, которые позволяют выявить ряд особенностей работы ФЭМ и всего электрооборудования, что дает незаменимую информацию для совершенствования программных, схемных и технических решений станций. На стадии испытания была разработана и запатентована [9] конструкция для крепежа фотоэлектрических модулей.

Работа выполнена по государственному контракту № 16.526.12.6017.

## Список литературы

- [1] Фортон В., Попель О. // Энергетический вестник. 2010. № 1(8). С. 9–28.
- [2] Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф., Петров Н.А. Матер. научн. сессии президиума Сибирского отделения РАН, Новосибирск, 13 декабря 2005 г. // РАН СО. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. С. 55–70.
- [3] Государственная информационная система в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности. <http://gisee.ru>.
- [4] Распоряжение Правительства РФ от 8 января 2009 г. № 1-р.
- [5] Елистратов В.В., Аронова Е.С. Солнечные энергоустановки. Оценка поступления солнечного излучения. Учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 164 с.
- [6] База данных NASA <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse>.
- [7] Changing System Parameters. <http://rredc.nrel.gov>.
- [8] Пресс-релиз <http://www.gasu.ru/univer/edu/dep/fmf/kaf/fiz/station.pdf>.
- [9] Устройство крепления фотоэлектрического модуля. Заявка на полезную модель № 2013115751 от 08.04.2013.