

УДК 621.382.83

## **АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АВТОНОМНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ТРУДНОДОСТУПНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ PVsyst**

*И.М. Кирпичникова., И.Б. Махсумов*

В статье представлены результаты моделирования работы автономной фотоэлектрической системы (АФС) в условиях труднодоступной местности Пенджикентского района Республики Таджикистан с использованием программного пакета PVsyst. В ходе моделирования проанализирована выработка электроэнергии, определены этапы и параметры проектирования АФС. Определено среднемесячное глобальное горизонтальное излучение для данной местности, ежедневное потребление электроэнергии, определены принципы построения 3D-модели АФС с затенениями.

Ключевые слова: автономная фотоэлектрическая система, солнечная инсоляция, затенение, полевые потери.

### **Введение**

По мере роста потребления электроэнергии, постоянно будет расти спрос на увеличение выработки электроэнергии, в том числе и от возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Среди различных видов ВИЭ в последние годы быстрыми темпами идет развитие солнечных фотоэлектрических систем. Ни один другой возобновляемый источник энергии не обладает таким большим потенциалом, как Солнце. В результате облучения Солнцем земная поверхность получает за один час такое количество энергии, которое достаточно для удовлетворения потребности в энергии всего человечества за один год. Использование такого источника энергии является достаточно эффективным в южных регионах, особенно в местах, где отсутствует централизованное электроснабжение, например, в труднодоступных горных районах Республики Таджикистан.

Маломасштабные жилые и коммерческие фотоэлектрические системы, связанные общей сетью, получают большую популярность благодаря новым и гибким конструкциям модулей, которые к тому же становятся экономичными. Правительства разных стран и коммунальные службы также стимулируют использование солнечных технологий.

Известно, что система будет работать с максимально возможной эффективностью только при одинаковых условиях эксплуатации. Рабочие характеристики фотоэлектрических систем всегда характеризуются различными параметрами, такими как географическое положение, ориентация солнечной панели, монтажная структура, климатические условия и т. д. [1–3].

## **Коэффициенты производительности PV модуля**

Факторы, влияющие на производительность PV, обладают следующими характеристиками:

1. *Температура*: эффективность фотоэлектрического элемента увеличивается за счет создания больших токов при низких температурах. Также напряжение на фотоэлементе увеличивается на 0,3–0,5 % на каждый градус Цельсия ниже 25 °С. В температурном климате фотоэлектрическая система зимой будет генерировать меньше энергии, чем летом, но это связано с более короткими световыми днями, более низкими углами склонения солнца, большим облачным покровом, а не с более низкими температурами.

2. *Сезонность*: город Пенджикент, в котором проводится анализ АФС, получает около 8 часов солнечного света в день и имеет благоприятную погоду для создания АФС.

3. *Частичное затенение*: влияние затенения на выходную мощность типичных фотоэлектрических установок является нелинейным. Небольшое количество тени на части массива может привести к значительному снижению выходной мощности.

4. *Загрязнение*: любой материал, чаще всего в виде пыли и снега, осаждаемый на стекле фотоэлектрического модуля, мешает поступающему излучению и отрицательно влияет на генерирующий потенциал модуля. Величина потерь от загрязнения сильно зависит от климата и места эксплуатации установки.

5. *Старение*: выход мощности любого фотоэлектрического модуля будет постепенно снижаться в течение срока его службы после завершения начального периода обкатки и это, прежде всего, связано с их работой в условиях повышенных температур.

## **Автономная PV-система**

**А. Введение:** Автономные фотоэлектрические системы, иногда называемые автономными системами, предназначены для обеспечения электричеством объектов без использования дополнительной электросети. В автономных фотоэлектрических системах PV модули часто используются для зарядки батарей, которые, накапливая электрическую энергию, производимую модулями, обеспечивают пользователей электрической энергией по требованию. В случае автономных фотоэлектрических систем, устанавливаемых в жилых зданиях, потребность в электричестве в основном покрывается этой системой. Избыток подается в аккумулятор для хранения. Для подачи электроэнергии в автономное оборудование требуется преобразование постоянного тока в переменный с помощью инвертора. Резервный генератор требуется в случае чрезвычайной ситуации. На рис. 1. представлена схема такой автономной фотоэлектрической системы [4, 6].

**Б. PVsyst:** Среди различных программ расчета фотоэлектрических систем наиболее популярным является программное обеспечение для модели-

рования PVsyst. Оно дает подробные характеристики фотоэлектрических установок в условиях эксплуатации, в том числе в неоднородных. Помимо PVsyst, в настоящее время для моделирования ФЭС используется около двенадцати программных инструментов, например, PV FChart, SOLCEL-II PVSIM, PVFORM, TRNSYS, PVLab, PVSS, RETSCREEN, Renew, SimPhoSys, PVSOL Expert, HOMER, SolarPro и т. д. [5].



Рис.1. Схема автономной фотоэлектрической системы

**С. Дизайн:** Порядок проектирования автономной фотоэлектрической системы описан ниже. Проектирование АФС происходит в несколько этапов.

1. Определение нагрузки потребителя за день.

В табл. 1. показана средняя электрическая нагрузка для жителей Пенджикентского района.

Таблица 1

Нагрузка потребителя за день

Наименование приборов	Количество шт.	Потребляемая мощность (Вт)	Использование за сутки (час)	Потребление энергии за сутки (Вт·ч/день)
Лампа светодиодная	8	10	5	400
Телевизор TV/ПК Мобильный	2	20	5	200
Чайник электрический	1	2200	1	2200
Холодильник	1	33,3	24	799
Кондиционер мобильный	1	785	6	4710
Стиральная машина	1	2200	1	1100
ИБП		6	24 ч/день	144 Вт·ч /день
Общее дневное потребление электроэнергии				9553 Вт·ч/день

2. Параметры аккумуляторной батареи:
- требуемая емкость батареи – 21323 А·ч.;
  - ток выбранной батареи – 1247 А·ч.;
  - количество параллельных батарей – 19;
  - общая емкость батареи – 23693 А·ч.;
  - напряжение выбранной батареи – 51 В.

3. Определение солнечного излучения для места расположения.

Данные по ежемесячной освещенности рассматриваемой местности отражены в табл. 2.

Таблица 2

Ежемесячные данные об освещенности г. Пенджикента

Месяцы	I	II	III	IV	V	VI
Глобальное горизонтальное излучение, кВт/м <sup>2</sup> /день	1,726	3,951	4,271	3,877	7,238	8,807
Месяцы	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Глобальное горизонтальное излучение, кВт/м <sup>2</sup> /день	8,479	5,215	6,031	4,537	2,711	1,724
За год	4,9 кВт/м <sup>2</sup> /день					

4. Размеры фотоэлектрической матрицы определяются исходя из того, что система будет использоваться круглый год, а энергопотребление будет достаточно постоянным.

В качестве фотоэлектрического модуля была выбрана модель Poly 285 Wp из 72 ячеек на основе поликристаллического кремния в количестве 48 штук.

**Проект:** Для автономной фотоэлектрической системы основными параметрами, необходимыми для моделирования, являются следующие:

- база данных фотоэлектрических компонентов, включающая напряжение разомкнутой цепи, ток короткого замыкания, шунтирующие, а также последовательные сопротивления и набор констант.

- база данных инвертора состоит из требуемого напряжения и мощности.

- рейтинги, информация о географическом местоположении, включающие широту, долготу, высоту и т. д., а также ежемесячные метеорологические данные для горизонтальной глобальной освещенности и температуры в данный момент времени.

Метеорологические данные для исследования получены из Meteororm версии 7.2, Sat = 100 % глобальной климатологической базы данных для применений солнечной энергии [5].

**1. Местоположение:** в части проекта определено географическое местоположение – город Пенджикент, с широтой 39,27° и долготой 67,68°.

**2. Ориентация:** в части ориентации панели обращены, как правило, на юг. Угол, который панели будут формировать относительно земли (угол наклона), задается.

Разница между потреблением энергии в зимнее и летнее время велико, но на широте Республики Таджикистан разрыв в солнечных ресурсах зимой и летом небольшой. Это причина, почему наклон должен быть оптимизирован для летних месяцев. Наклон солнечных панелей для данной местности составляет около  $45^\circ$ , при азимуте  $0^\circ$ .

**3. Горизонт:** линия горизонта показывает, сколько полезного солнца действительно доступно на данный момент времени. На используемых графиках указываются препятствия внутри солнечного круга, в основном деревья, и соответствующее автоматическое затенение фотоэлектрических модулей.

**4. Ближайшее затенение:** эта часть программного обеспечения имитирует эффект тени от ближних объектов, длина которых менее 50 метров. Для реализации рисуется 3D симуляция с домом, деревом и с фотоэлектрическими панелями.

Трехмерное построение требует планов архитектора, то есть точного знания размеров, положения и высоты массива и окружающих препятствий. График справа от визуализации показывает потери затенения в этот конкретный момент вместе с линейными потерями луча.

**5. Система:** в отличие от сетевой фотоэлектрической системы, размер автономной фотоэлектрической системы будет зависеть от требований пользователя, где пользователь должен ввести желаемую номинальную мощность, или, в качестве альтернативы, доступной площади для установки фотоэлектрических модулей. В автономной фотоэлектрической системе инверторный модуль должен быть выбран из базы данных инвертора. Все цепочки подключенных фотоэлектрических модулей должны быть однородными, это означает, что модули должны быть одинаковые, их количество также одинаковое, в одной последовательности, иметь одинаковую ориентацию и т. д. На рис. 2 показана принципиальная схема автономной системы. Диод, показанный здесь, является перепускным диодом, используемым в целях защиты.

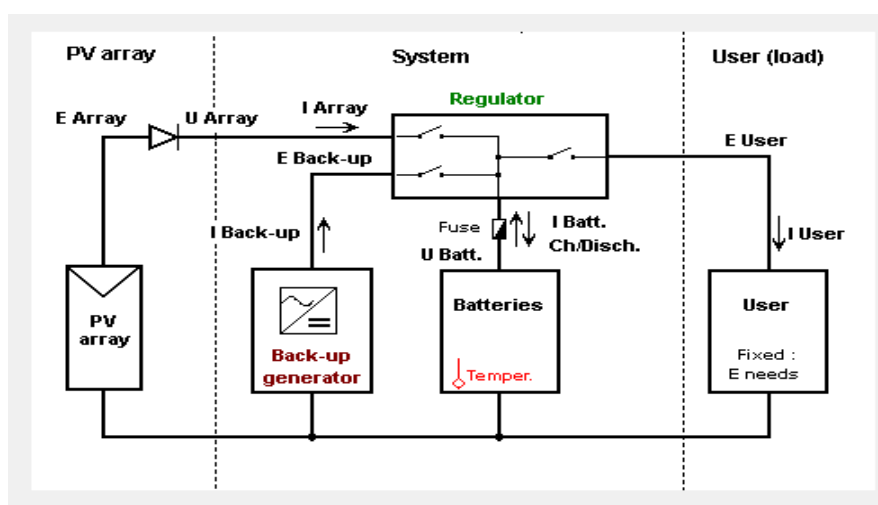


Рис. 2. Схема автономной системы

## Результаты моделирования автономной фотоэлектрической системы

**А. Модули PV:** Чтобы понять основные характеристики фотоэлектрического модуля и массива, мы используем I–V характеристики, обычно встречающиеся в производственных паспортах. Производители фотоэлектрических модулей используют разные солнечные элементы, следовательно, ожидается, что характеристики фотоэлектрического модуля отличаются от одного производителя к другому. Различные качества солнечных элементов используются одним и тем же производителем для модулей в сегментах рынка.

Существует множество моделей для работы солнечных элементов, но обычно используется пяти – параметрическая модель, поскольку она использует соотношение тока и напряжения для одного солнечного элемента и учитывает только элементы или модули, включенные последовательно [7, 8].

Мощностные и вольт-амперные характеристики различных модулей имеют разные значения при изменении инсоляции, температуры воздуха и угла наклона модулей к горизонту. Это необходимо учитывать при проектировании АФС.

**Б. Затенение фотоэлектрических модулей:** Затенение отдельной фотоэлектрической ячейки приводит к уменьшению инсоляции за счет доли ячейки, которая затенена, и ток, производимый ячейкой, соответственно уменьшается. Когда ячейка находится в цепи с обходными диодами и другими фотоэлементами в последовательных и параллельных комбинациях, поведение всей цепи становится сложной [5, 6].

В таблице 3 показаны годовые сальдо и основные результаты сетевой фотоэлектрической системы. Из таблицы видно, что 27,31 °С – это температура окружающей среды в течение года. Энергия, которая может быть доставлена пользователю, составляет около 3,612 МВт.

Таблица 3  
Основные результаты моделирования АФС

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	E_Avail kWh	EUnused kWh	E_User kWh	E_Load kWh	SolFrac
January	62.4	95.9	1097	740	325.0	325.0	1.000
February	84.1	119.5	1365	1054	293.6	293.5	1.000
March	116.4	126.8	1455	1125	315.4	315.4	1.000
April	150.9	138.4	1586	1263	305.3	305.2	1.000
May	191.4	153.3	1761	1427	315.4	315.4	1.000
June	226.6	171.6	1950	1646	286.7	286.6	1.000
July	239.7	187.3	2120	1806	296.3	296.1	1.000
August	216.8	195.0	2200	1884	296.3	296.1	1.000
September	173.8	195.4	2213	1913	281.6	281.5	1.000
October	121.4	162.0	1855	1546	291.0	290.9	1.000
November	76.4	121.3	1392	1089	281.6	281.5	1.000
December	55.2	89.5	1025	688	325.0	325.0	1.000
Year	1715.1	1756.1	20019	16180	3613.1	3612.1	1.000

## Заключение

Производительность фотоэлектрических систем зависит от технологии материалов, производства и производственного процесса. При моделировании учитываются потери, которые вызваны затенением, положением модуля, используемым оборудованием, характеристиками солнечных модулей и т. д. Подробный анализ всех типов потерь обеспечивает программное обеспечение PVsyst. Использование PVsyst позволяет оптимально подобрать подходящие модели для всех частей фотоэлектрической системы, включая все выявленные источники потерь. Однако, при моделировании сохраняются основные неопределенности производства фотоэлектрических данных: метеоданные (источник и годовая изменчивость), модели фотоэлектрического модуля и достоверность спецификаций производителя. Вопросы учета и корректировки таких неопределенностей являются темой следующих научных исследований.

## Библиографический список

1. Suresh, P. Performance Analysis of Stand-alone PV Systems Under Non-Uniform Operating Conditions Using PVsyst Jaimol Thoma / S. Parvathy, T. Jaimol // Advanced Research in Electrical and Electronic Engineering. – 2014. – Vol. 1(4). – P. 29–33.
2. MacAlpine, S.M. Characterization of Power Optimizer Potential to Increase Energy Capture in Photovoltaic Systems Operating Under Non-Uniform Conditions / S.M. MacAlpine, R.W. Erickson, M.J. Brandemuehl // IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS. – 2013. – Vol. 28(6). – P. 2936–2945.
3. Performance of Solar Power Plants in India, Submitted by Dr. B D Sharma to Central Electricity Regulatory Commission. – New Delhi, India. – 2011/
4. National Renewable Energy Laboratory (NREL) [Электронный ресурс]. – Available at: <https://www.nrel.gov/index.html> (accessed: 23.03.2020).
5. Sharma, P. Enhancement of energy generation from two layer solar panels / P. Sharma, T. Harinarayana // International Journal of Energy and Environmental Engineering. – 2012. – Vol. 3(12). – P. 1–9.
6. PVsyst [Электронный ресурс]. – Available at: <https://www.pvsyst.com/> (accessed: 23.01.2020).
7. Ramaprabha, R. Impact of Partial Shading on Solar PV Module Containing Series Connected Cells / R. Ramaprabha, B.L. Mathur // International Journal of Recent Trends in Engineering. – 2009. – Vol. 2(7). – P. 56–60.
8. PVCDROM [Электронный ресурс]. – Available at: <https://www.pveducation.org/pvcdrom> (accessed: 23.01.2020).

[К содержанию](#)