

# ВЫБОР ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ АВТОНОМНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ PVsyst

*И.М. Кирпичникова, И.Б. Махсумов*

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Бурное развитие солнечной энергетики стимулирует строительство новых электростанций, надежная и эффективная работа которых определяется правильным проектированием, моделированием и выбором оптимального оборудования. В данной статье рассматриваются этапы моделирования автономной солнечной электростанции для электроснабжения домов одного из труднодоступных и неэлектрифицированных регионов Республики Таджикистан с использованием программного пакета для анализа и моделирования фотоэлектрических систем PVsyst, описан принцип работы программы, этапы и структура моделирования.

Для оценки производительности фотоэлектрических систем учитывалось географическое положение, ориентация панели, монтажная структура, климатические условия. Используя функции программы, на основе суточного графика нагрузки выбрали основное электрооборудование солнечной электростанции: контроллер, фотоэлектрический модуль, аккумуляторные батареи, резервный источник питания. Построена 3D-модель объекта с использованием графика горизонта и диаграммы затенения. Коэффициент производительности и доля солнечной энергии, которые являются индексом эффективности, показали высокий уровень использования системы.

*Ключевые слова:* солнечная энергетика, программное обеспечение PVsyst, автономная фотоэлектрическая система, электрооборудование солнечной электростанции, коэффициент производительности.

## **Введение**

Солнце является глобальным источником энергии для нашей планеты. За один час Земля получает солнечной энергии, достаточной для удовлетворения своих энергетических потребностей в течение года. Прямое преобразование солнечного света в электричество происходит за счет фотоэлектрической системы (ФЭС), являющейся привлекательной альтернативой традиционным источникам электроэнергии по многим причинам: это безопасная, бесшумная и экологически чистая высокомодульная система, в которой емкость солнечных модулей может постепенно увеличиваться в соответствии с постепенным ростом нагрузки. ФЭС не требует специальной подготовки для работы и технического обслуживания, ее можно установить практически на любом открытом месте. Надежность системы обусловлена тем, что она не содержит движущихся частей, имеет минимальную частоту отказов и предполагаемый срок службы от 20 до 30 лет [1, 2]. Производство электроэнергии с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ) снижает воздействие на окружающую среду и производит наименьшее количество вторичных отходов.

Фотогальваническая (PV) система состоит из фотоэлектрической батареи, аккумулятора и элементов для питания. Фотоэлектрическая система преобразует солнечную энергию в энергию постоянного тока. Если используются переменные нагрузки, системе требуется преобразователь постоянного тока в переменный. Существует два типа

фотоэлектрических систем: для параллельной работы с сетью и автономная [3].

Фотоэлектрические системы, подключенные к электросети, подают электроэнергию непосредственно в электрическую сеть, работая параллельно с обычным источником энергии. Системы, подключенные к сети, вырабатывают чистое электричество вблизи точки использования, без потерь при передаче и распределении, а также без необходимости использования батарей.

Автономная система не требует взаимодействия с энергосистемой, поэтому генерируемые источники питания обеспечивают только проектную нагрузку. В случае, если фотоэлектрическая станция напрямую не отдает энергию на нагрузку, необходимо использовать аккумулятор [3, 4]. Аккумуляторная батарея накапливает энергию, когда мощность, подаваемая фотоэлектрическими модулями, превышает нагрузку и освобождает ее при недостаточном питании. Автономное фотоэлектрическое производство электроэнергии используется в основном в домах или в зданиях для целей электрификации [4, 5].

## **1. Этапы и принцип работы программного пакета PVsyst при моделировании автономной фотоэлектрической системы**

Для анализа и определения параметров фотоэлектрических систем, как подключенных к сети, так и автономных, существует широкий спектр инструментов, одним из которых является специальный программный пакет PVsyst для проектиро-

## Альтернативные источники энергии

вания ФЭС, разработанный в Женевском университете [6]. Он включает в себя предварительную технико-экономическую поддержку, поддержку размеров и моделирования для фотоэлектрических систем. После определения местоположения и нагрузки пользователь выбирает различные компоненты из базы данных продукта и программное обеспечение автоматически рассчитывает размер системы. В зависимости от местоположения региона программа PVsyst может также рассчитать коэффициент производительности, нормализованный энергетический профиль и диаграмму потерь. Ее обширная географическая база данных может дать точную информацию о солнечном излучении по часам в конкретной области страны.

Наши исследования выполнялись с использованием PVsyst V6.86 (рис. 1) для индивидуального потребления Республики Таджикистан, в процессе моделирования были сгенерированы графики и таблицы, представленные в данной статье.

### 1.1. Принцип работы программного обеспечения PVsyst

Принцип работы PVsyst заключается в следующем. Прежде всего надо определить ориентацию и параметры поля (фиксирование наклонной плоскости и азимута) для максимальной выработки солнечных панелей. Затем определяется потребность в электроэнергии пользователей, для чего выбирается бытовая техника для ежедневного использования. Программа даёт возможность определить график нагрузки по месяцам и по времени года с учетом сезонного изменения нагрузки потребителем.

Далее выбираются тип, количество и технические характеристики аккумуляторных батарей, фотоэлектрических панелей, контроллера заряда

и разряда аккумуляторов и резервная генераторная установка для поддержки автономной системы.

В следующем разделе автоматическим образом моделируются разные потери и снижение эффективности фотоэлектрической системы за счет температуры окружающей среды, омических потерь, потерь на загрязнение и потерь за счет угла наклона. Также определяется горизонт дальнего затенения с учетом плоскости наклона и азимута.

В следующих разделах строится 3D-модель затенения системы и рассчитывается таблица коэффициентов затенения. Далее определяются экономические оценки данного проекта, на последнем этапе запускается процесс моделирования для анализа производительности построенного проекта в реальном времени. Результаты моделирования конвертируются в формат PDF для использования. Структура моделирования показана на рис. 2.

### 1.2. Географическое положение

Для рассматриваемого участка Таджикистана выбрано географическое положение труднодоступной местности, село Рогич Пенджикентского района, расположенное на севере республики с широтой  $39.27^\circ$  N и долготой  $67.68^\circ$  E. Метеорологические данные получены из Meteonorm 7.2, Sat = 100 % – Synthetic, глобальной климатологической базы данных для применения солнечной энергии, с ежегодной солнечной радиацией  $5,5\text{--}6,6$  кВт·ч/м<sup>2</sup>/день на высоте 1582 м над уровнем моря [7]. Для получения максимального солнечного излучения угол наклона для фотоэлектрической матрицы сохраняется равным широте соответствующего местоположения.



Рис. 1. Скриншот интерфейса программы PVsyst

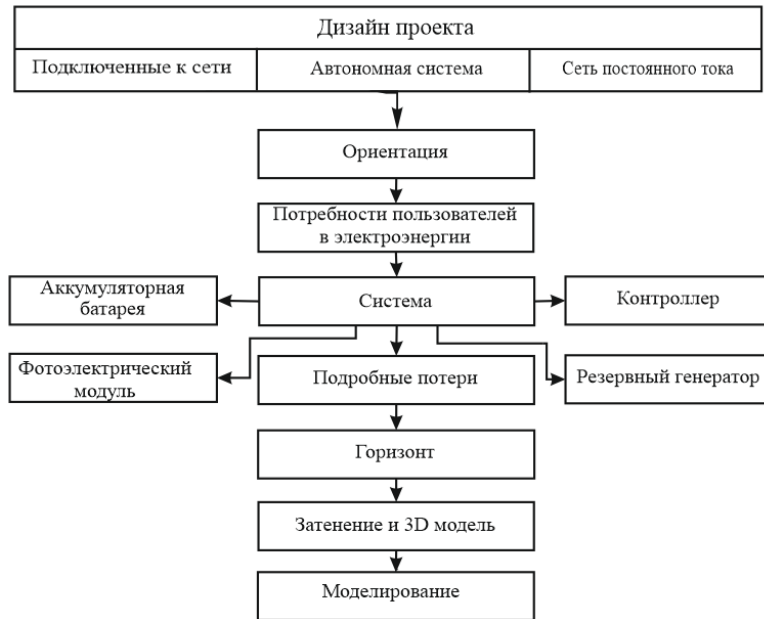


Рис. 2. Структура выполнения моделирования в программе PVsyst

**2. Автономная система**

Размер автономной фотоэлектрической системы (АФС) будет зависеть от требований пользователя, и разработчик системы должен ввести желаемую номинальную мощность или доступную площадь для установки фотоэлектрических модулей. Модуль инвертора должен быть выбран из предлагаемой

базы данных инверторов. Все линии подключенных фотоэлектрических модулей должны быть однородными: идентичные модули, одинаковое количество последовательно соединенных модулей, одинаковая ориентация и т. д. На рис. 3 показана схема автономной фотоэлектрической системы, на рис. 4 – принципиальная схема автономной системы.

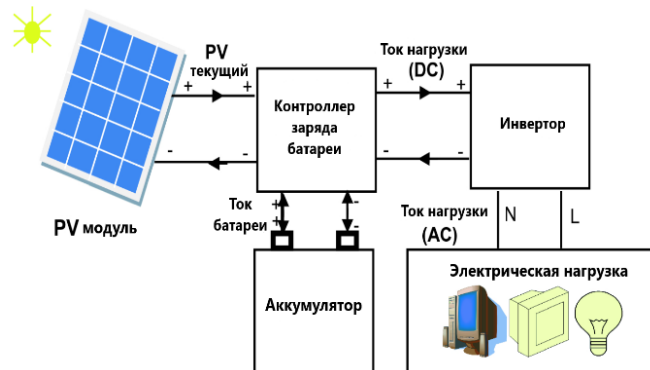


Рис. 3. Схема автономной фотоэлектрической системы

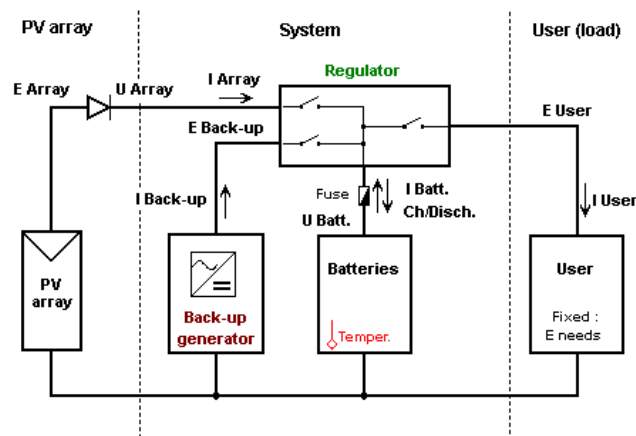


Рис. 4. Принципиальная схема автономной системы

## Альтернативные источники энергии

Диод является перепускным диодом, используемым в целях защиты.

### 2.1. Ориентация

На этапе ориентации необходимо настроить и выбрать оптимальный угол наклона для максимальной выработки электроэнергии автономной системой. В нашем случае панели обращены на юг, угол наклона, который панели будут формировать относительно земли, задается. Разница в потреблении энергии между зимним и летним временем велика, однако на этой широте разрыв между солнечными ресурсами зимой и летом незначительный. По этой причине наклон солнечных модулей должен быть оптимизирован для летних месяцев [8]. Здесь наклон составляет  $5^\circ$ , а азимут  $0^\circ$ , что является наиболее оптимальным для максимальной выработки электроэнергии в данной местности. Интерфейс определения ориентации солнечных модулей представлен на рис. 5.

### 2.2. Определение нагрузки

Для моделирования автономной фотоэлектрической системы должна быть определена потреб-

ность в энергии, чтобы избежать чрезмерного увеличения мощности энергосистемы и дополнительных затрат [9]. Потребление энергии определяется на основе ежедневной используемой мощности электроприборов и времени их работы. Для расчетов выбран следующий набор электроприемников: 10 светодиодных ламп, 2 телевизора, 1 электрический чайник, 1 холодильник, 1 стиральная машина и 1 мобильный кондиционер. В зимнее время года обогреватель заменяет кондиционер.

Такие часто используемые приемники электроэнергии, как лампы и телевизоры, обычно включаются с 8:00 до 13:00 и с 19:00 до 23:00 каждый день. Остальные приемники используются в дневное время в среднем 1–2 ч. Среднечасовая мощность нагрузки составляет около 120 Вт, а пиковая мощность, при которой при необходимости используется большинство электроприемников, составляет 6573 Вт за использованный час. Таким образом, средняя оценка суточной потребляемой энергии принимается равной 10483 кВт·ч/сут, график нагрузки показан на рис. 6.

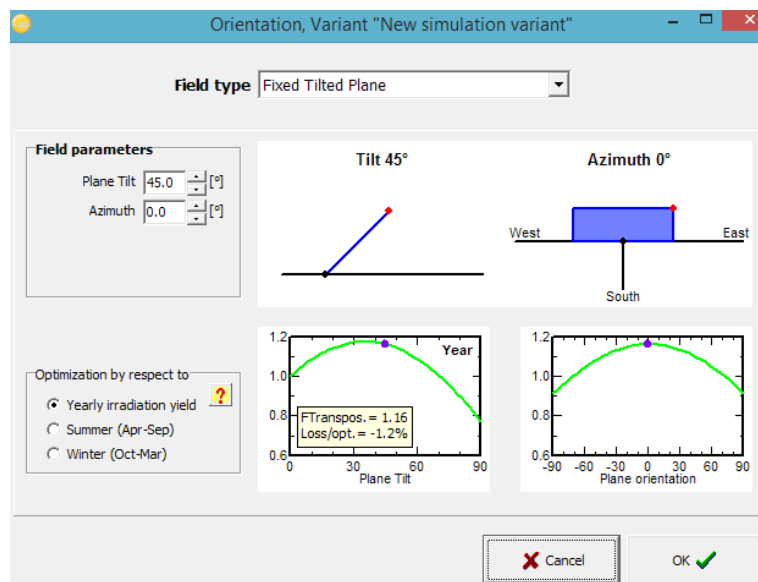


Рис. 5. Наклон и ориентация панели PV

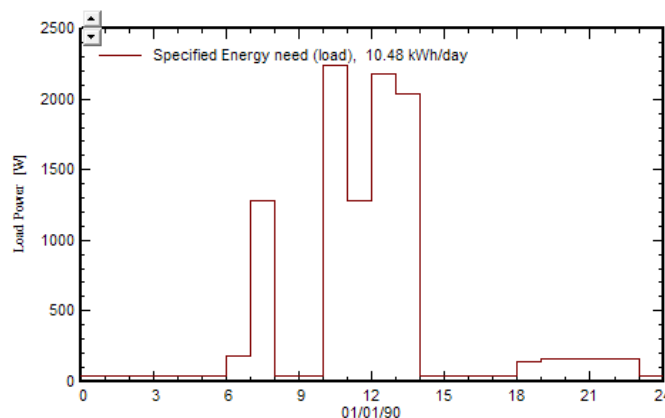


Рис. 6. Суточный график нагрузки потребителя

### 2.3. Выбор параметров электрооборудования и настройка системы

Выбор параметров каждого компонента очень важен для выполнения конфигурации системы. Все компоненты данной работы выбирались, исходя из потребности в энергии, необходимой для покрытия нагрузки и потенциальных метеорологических данных на месте установки. В табл. 1 приведен список электрооборудования, рекомендуемого для использования в АФС.

#### 2.3.1. Выбор аккумуляторной батареи

При выборе аккумуляторов прежде всего рассматривается его эффективность. Эффективность батареи – это отношение энергии, получаемой от батареи, к энергии, подаваемой батарее, при возвращении в то же состояние заряда и разряда (SOC). Существуют следующие показатели эффективности аккумуляторов: кулоновская (или фарадическая) эффективность, омическая эффективность и температурная эффективность [6]. КПД батареи определяется произведением этих показателей.

Выбор батарей для фотоэлектрических систем включает в себя множество параметров и критериев, которые показаны на рис. 7.

При моделировании потерь эффективности необходимо учитывать, что входная и выходная энергии накапливаются час за часом.

Окончательный результат даст баланс в течение значительного времени от всех этих вкладов. Глобальная потеря эффективности будет частью окончательных результатов (ежемесячно или ежегодно). Принцип дизайна для определения размера батареи системы состоит в том, чтобы компенсировать ежедневные изменения солнечной радиа-

ции, а не действовать как сезонное накопление энергии [10].

Фотоэлектрические модули не могут являться источником зарядки аккумулятора. Это связано с ненадежностью выходного сигнала, который значительно зависит от условий окружающей среды. Следовательно, оптимальный цикл зарядки-разрядки не может быть обеспечен, что приведет к низкому заряду аккумулятора (SOC) и скажется на сроке службы батареи [11].

При выборе аккумуляторных батарей программа PVsyst предлагает оптимальный вариант типа и количества батарей для автономной системы, исходя из нагрузки потребителей и других факторов. В нашем случае выбрано 19 штук литий-ионных (Li-ion), аккумуляторов универсального регулируемого типа.

В литий-ионных аккумуляторах напряжения холостого хода  $U_{oc}$  должно быть линейным, но среднее напряжение и отклонение от него зависят от производителя. Например, для технологии Li-LFP среднее напряжение обычно составляет около 3,3 В, а отклонение – около 0,15 В/SOC, для NMC и NCA среднее напряжение равно примерно 3,7 В, а отклонение намного выше, около 0,78 В/SOC. Что касается свинцово-кислотных, также существует функция уменьшения ниже SOC, равная 10 или 15 %, которая оценивается по кривым разряда, предоставленным производителями.

Напряжение холостого хода не должно зависеть от температуры. При выборе и настройке аккумуляторов программа PVsyst не предусматривает увеличения напряжения разомкнутой цепи при высоком SOC. Эффективное повышение напряжения будет связано с резким увеличением внутрен-

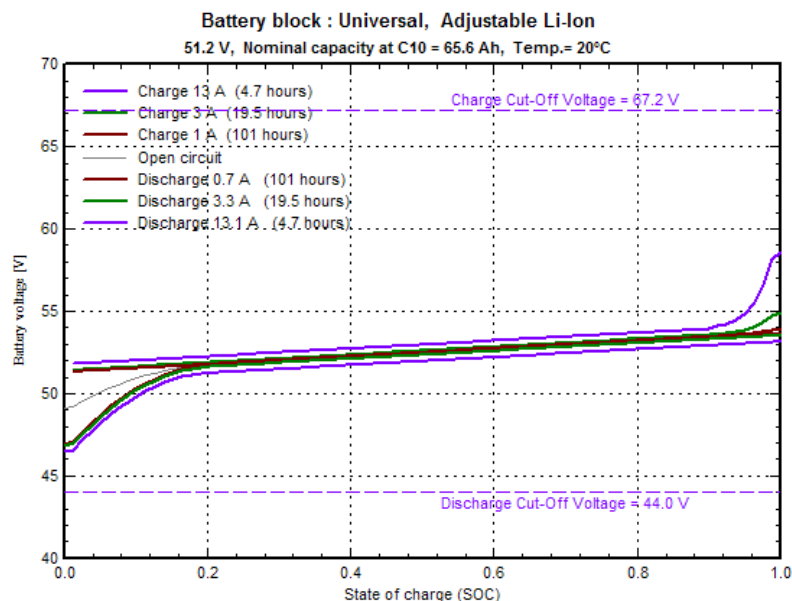
Электрооборудование, используемое в АФС

Таблица 1

№	Наименование оборудования	Модель	Кол-во, шт.
1	Фотоэлектрический модуль с поликристаллическим кремнием (производитель Generetic)	Generetic, Poly 285 Wp 72 ячеек	48
2	Блок аккумуляторной батареи, тип универсальный	Регулируемый литий-ионный Universal (Li-ion)	19
3	Универсальный контроллер (производитель Generetic)	Universal controller with DCDC converter	1
4	Резервная генераторная установка	Номинальная мощность 3,0 кВт Эффективная мощность 1,5 кВт	1



Рис. 7. Критерии выбора батареи



**Рис. 8.** Характеристики напряжения холостого хода при различном состоянии заряда и разряда блока аккумуляторов модель 65,6 Ач литий-ионный Universal (Li-ion)

него сопротивления для тока зарядки. На рис. 8 показаны характеристики напряжения холостого хода при различном состоянии заряда блока аккумуляторов для литий-ионной модели с емкостью 65,6 А·ч.

### 2.3.2. Выбор и настройка фотоэлектрического модуля

Размер фотоэлектрической матрицы зависит от солнечного излучения, он должен обеспечить достаточную энергию для нагрузки и для зарядки батареи [12].

Чтобы получить максимальное количество солнечного излучения, фотоэлектрическую матрицу необходимо расположить под определенным углом. Фиксированный массив PV в северном полушарии обычно ориентирован на юг. Оптимальная мощность массива PV может быть достигнута при использовании угла наклона, приблизительно равного географической широте местности (для наших исследований этот угол составляет 45°).

Размер PV может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от требуемой нагрузки [13]. В данной работе в качестве фотоэлектрического модуля была выбрана модель Generetic, Poly 285 Wp 72 ячейки с поликристаллическим кремнием, в количестве 48 штук от производителя Generetic.

Чтобы определить основные параметры фотоэлектрического модуля и массива, мы используем вольт-амперные (ВАХ) характеристики, которые обычно задаются в производственных паспортах. Производители фотоэлектрических модулей используют разные солнечные элементы, следовательно, характеристики фотоэлектрического модуля, собранного из таких элементов, отличаются друг от друга в зависимости от производителя. Различные качества солнечных элементов используют-

ся одним и тем же производителем для модулей в сегментах рынка солнечной энергетики [14, 15].

На ВАХ (I-V) и мощностные (P-V) характеристики фотоэлектрических модулей влияет освещенность, угол наклона и температура окружающей среды. Максимальная эффективность фотоэлектрических модулей соответствует требованию STC (1000 Вт/м<sup>2</sup>, 25 °С), но в реальных условиях эксплуатации температура воздуха меняется практически каждый час, что в большинстве случаев приводит к снижению эффективности модулей. Учитывая этот факт, использование фотоэлектрических модулей в условиях повышенной температуры является неэффективным, так как в жарком климате уменьшается выработка электроэнергии и срок эксплуатации. Для решения этой проблемы авторами [16, 17] были проведены экспериментальные исследования нагрева солнечных модулей с использованием голографической термозащиты с целью повышения энергетической эффективности и защиты модулей от перегрева.

Результаты эксперимента показали, что голографическая термозащита уменьшает температуру на поверхности фотоэлектрических модулей в среднем на 5 °С по сравнению с открытым модулем.

Аналогичную ситуацию можно смоделировать с помощью программного пакета PVsyst и построить вольт-амперные и мощностные характеристики при изменении температуры.

На рис. 9 показаны ВАХ при температуре окружающей среды 25 и 55 °С при одинаковой освещенности. Как видно, ток короткого замыкания практически не зависит от температуры, а напряжение холостого хода, которым определяется выходная мощность, зависит от нее значительно.

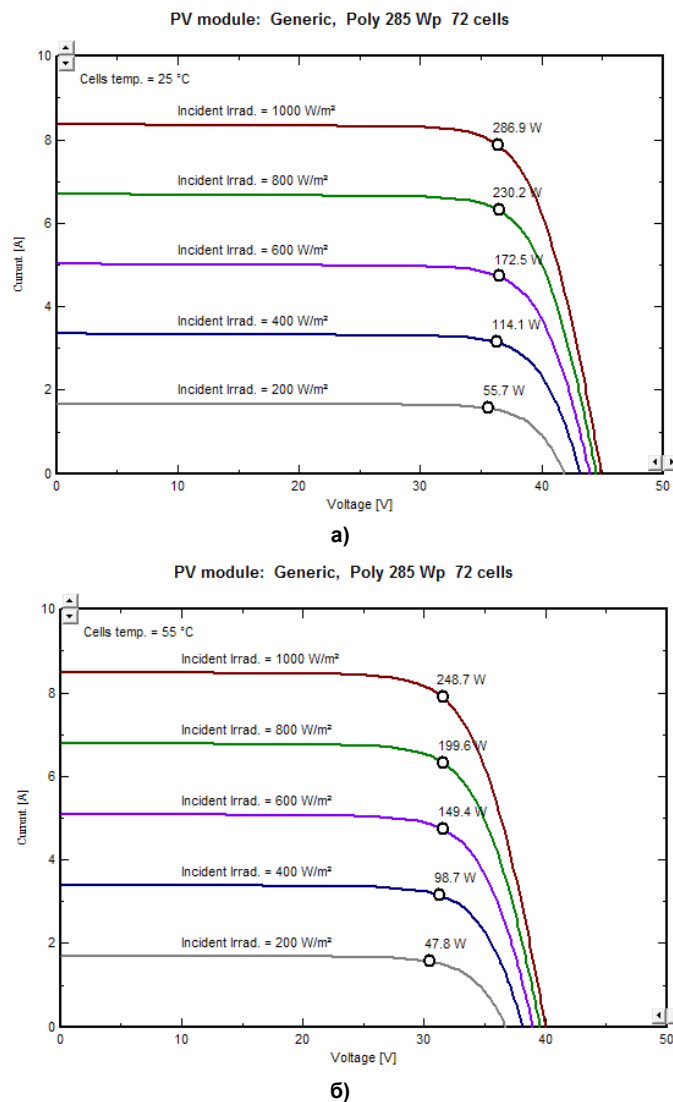


Рис. 9. Вольт-амперные характеристики солнечного модуля при температуре: а) 25 °С и б) 55 °С

Следовательно, использование термозащиты модуля будет способствовать сохранению его эффективной работы.

### 2.3.3. Выбор и настройка универсального контроллера

Регулятор является важным компонентом PV системы. Он используется для защиты аккумуляторов от перезаряда и чрезмерного разряда в связи с увеличением емкости и продлением жизненного цикла. При напряжении, меньшем чем требуется, аккумулятор не будет перезаряжаться, а при чрезмерном напряжении аккумулятор будет перегреваться, что приведет к повреждению клемм аккумуляторных элементов [18].

Преобразователь MPPT, который преобразует режим постоянного тока в режим переменного тока, не всегда работает с максимальной эффективностью. Максимальный КПД, который может быть получен, составляет 96 %. Учитывая нагрузку и количество аккумуляторов, программа PVsyst

предлагает выбрать универсальный контроллер с технологиями DC-DC-преобразователь от производства Generetic. Также был предусмотрен резервный генератор на 3 кВт, для поддержки автономной системы при недостатке солнечного излучения.

### 3. Определение горизонта и окружающего затенения

Для определения условий эксплуатации солнечной электростанции необходимо построить 3D-симуляцию с домом, деревом и фотозлектрическими панелями. Трехмерное построение предполагает наличие архитектурных планов, чтобы определить точные размеры здания, положения и высоты массива и окружающих препятствий. 3D-модель (рис. 10) построена с учетом горизонта, показывающего, сколько полезного солнца действительно доступно для фотозлектрической системы (рис. 11).

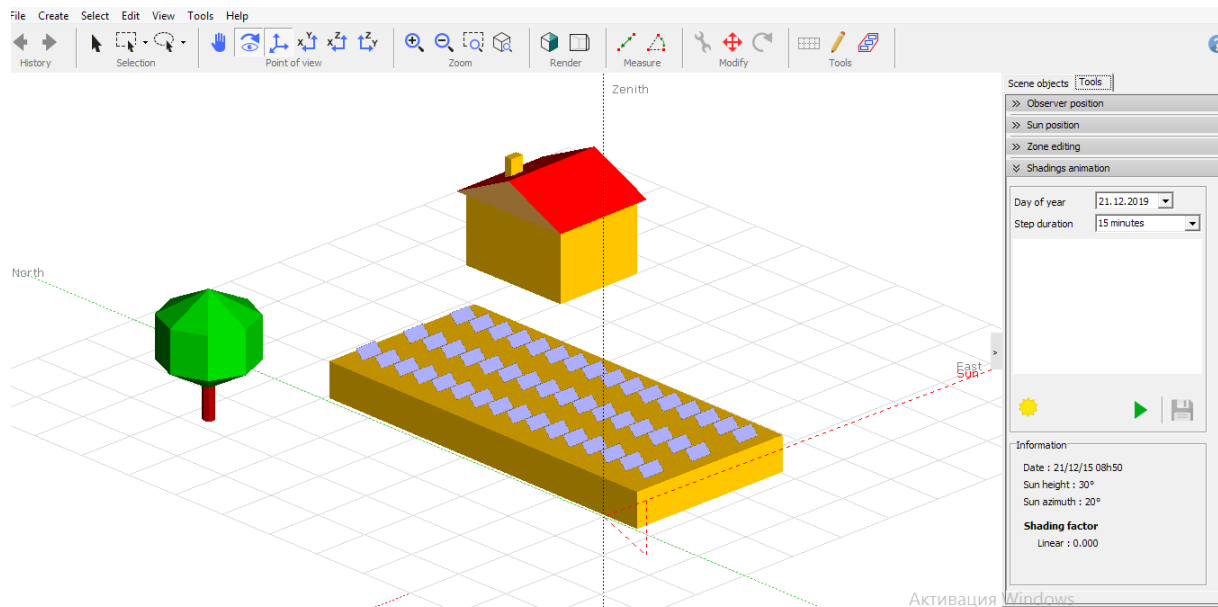


Рис. 10. 3D-симуляция эффекта тени

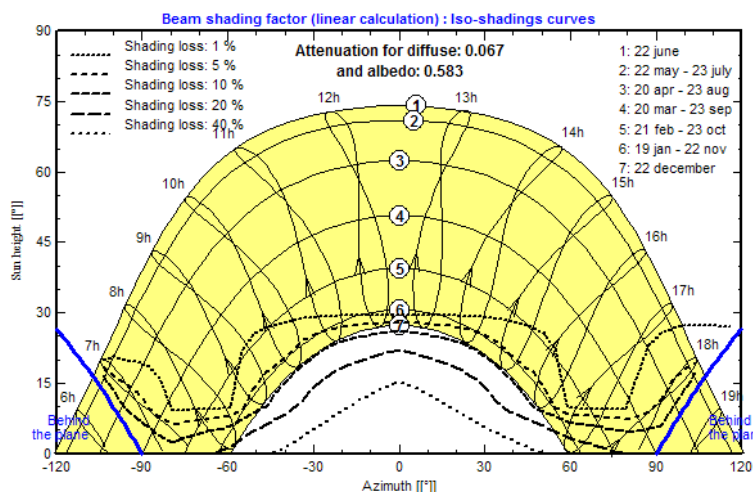


Рис. 11. Горизонт и диаграмма затенения

График горизонта учитывает все препятствия местности, где располагается СЭС, как от дальних объектов, так и ближних, на расстоянии менее 50 м. Здесь же можно увидеть, каким будет затенение с 22 июня по 22 декабря.

## 4. Результаты моделирования и анализ эффективности автономной фотоэлектрической системы

### 4.1. Анализ эффективности автономной системы

В процессе моделирования генерируются рисунки и таблицы, в которых отражены помесечные данные по основным параметрам, задаваемым потребителем. В табл. 2 показаны данные суммарной метеорологической и поступающей на поверхность фотоэлектрической системы солнечной энергии.

### 4.2. Основные результаты анализа производительности

Коэффициент производительности солнечной системы, выбранной с помощью программы PVsyst, показывающий соотношение между фактическим выходом (с инвертора) и целевым выходом (с массива PV), составил 13,57 %. Доля солнечной энергии в отношении к необходимой энергии составляет 100 %. Эти показатели представляют уровень использования системы (рис. 12).

На рис. 13 показана структура нормализованной выработки электроэнергии в автономной системе. Она была получена в ходе имитационного исследования и включает в себя основные потери и количество выработанной электроэнергии. Система максимально вырабатывает 13,68 кВт·ч/день. Избыточная энергия, при полностью заряженной батарее аккумуляторов составляет 3,24 кВт·ч/день.



Таблица 2

Количество энергии, поступающей от солнца и достигающей поверхности солнечной модулей

Глобальное горизонтальное облучение (GlobHor)	Горизонтальное диффузное облучение (DiffHor)	Общая глобальная падающая энергия на плоскости ФЭС (GlobInc)
1715,1 кВт·ч/м <sup>2</sup> в год	580,51 кВт·ч/м <sup>2</sup> в год	1946 кВт·ч/м <sup>2</sup> в год

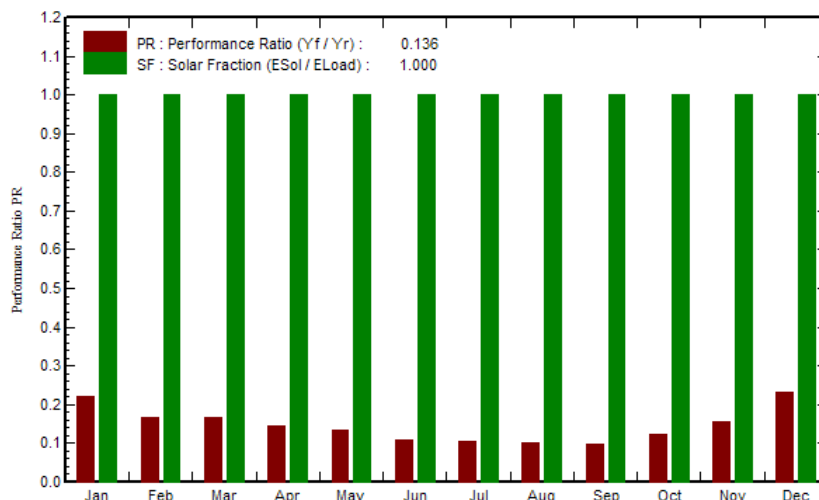


Рис. 12. Коэффициент производительности и доля солнечной энергии

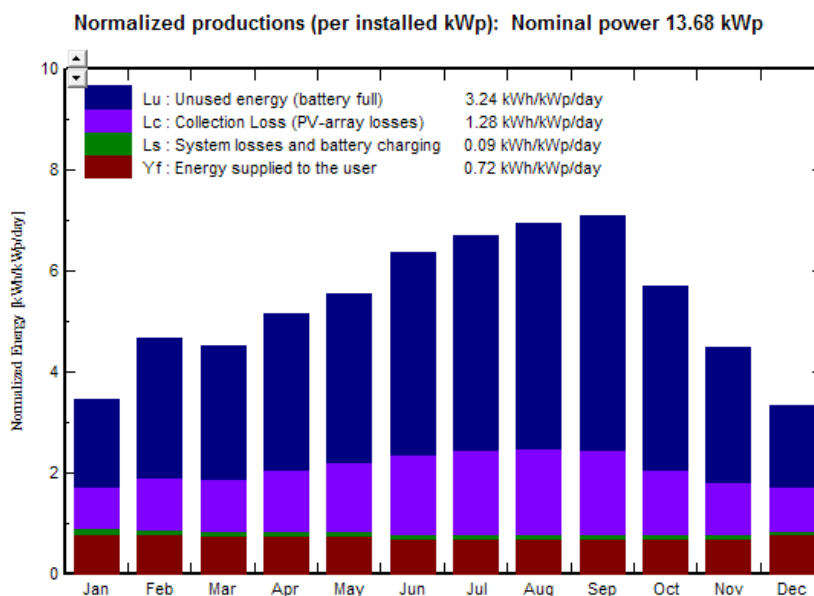


Рис.13. Нормализованная выработка электроэнергии

Энергия, передаваемая потребителю, составляет 0,72 кВт·ч в день.

4.3. Диаграмма годовых потерь

Подробная годовая диаграмма потерь, полученная в ходе моделирования, показана на рис. 14. Эффективное излучение на поверхности фотоэлектрического модуля, под действием которого производится электрическая энергия, составляет 1756 кВт·ч/м<sup>2</sup>. После преобразования PV-модулей номинальная энергия при стандартных условиях испытаний (STC) составляет

24 180 кВт·ч. Общий КПД фотоэлектрической станции при STC равен 14,8 %. На этой стадии возникают различные потери: 4 % – потери из-за высокой температуры, 0,75 % – из-за ухудшения качества модулей, 2,6 % – потери при присоединении; 5,13 % – омические потери. Таким образом, эффективная энергия на выходе солнечных модулей составила 4071 кВт·ч, с учетом потерь в элементах системы ежегодная доступная энергия на выходе инвертора составила 3612 кВт·ч, которая и передается потребителю [2, 19–21].

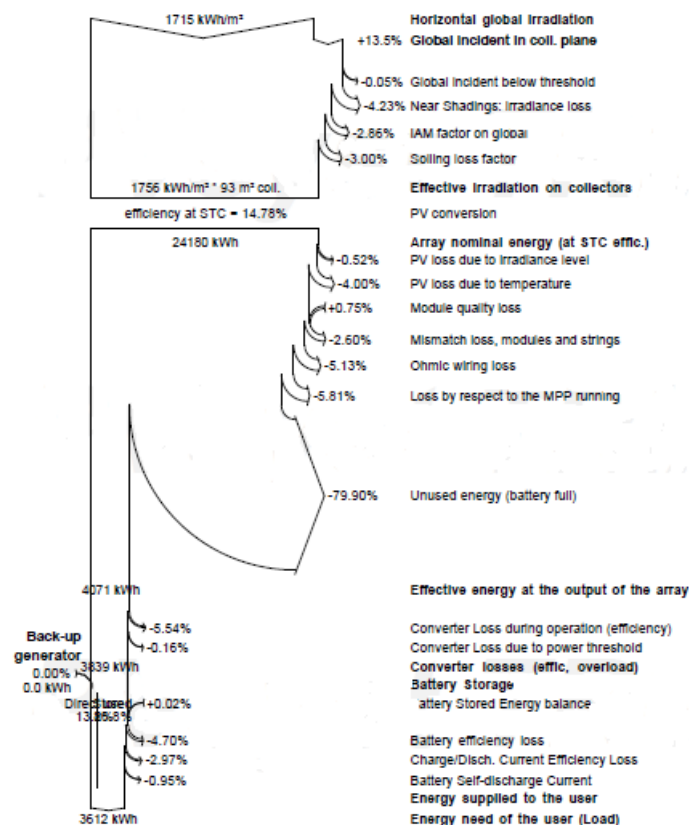


Рис. 14. Диаграмма годовых потерь электроэнергии автономной системы

## Заключение

В данной работе произведена оценка производительности автономной фотоэлектрической системы с помощью программного обеспечения PVsyst для одной из труднодоступных местностей Пенджикентского района Республики Таджикистан. Для оптимизации автономной системы определено дневное и месячное потребление электроэнергии, для максимальной эффективности системы настроена ориентация фотоэлектрических панелей. Выбрано и настроено электрооборудование для солнечной электростанции и резервный генератор для поддержки автономной системы.

Результат моделирования показал, что самый высокий уровень солнечной радиации в городе Пенджикенте наблюдается с апреля по июль и его значение варьируется от 150,9 до 239,7 кВт·ч/м<sup>2</sup>.

Определено, что, установив автономную систему мощностью 13,68 кВт в частном доме для ежедневной нагрузки 10 кВт·ч/день, система вырабатывает доступную энергию 20 МВт в год при удельной выработке 1463 кВт/кВт·ч/год. Годовая потребляемая энергия составляет 3,6 МВт·ч, неиспользованная энергия – 16,18 МВт·ч, а коэффициент полезного действия системы – 13,57%. Большинство солнечной энергии, приходящейся на анализируемый период, не преобразуется в полезную энергию из-за потерь при передаче, контактных потерь, тепловых и т. д.

Использование программы PVsyst позволяет выбрать качественное электрооборудование для солнечной электростанции и определить эффективность ее работы в условиях децентрализованного электроснабжения.

## Литература/References

1. Chetan Singh Solanki. Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and Application. Third edition, pp. 375–440. M. Young, The Technical Writer's Handbook. Mill Valley, CA: University Science, 1989.
2. Asia'u Talatu Belgore, Prof. Ranjit Rajak, Prof. Priyanka Patel. Performance Evaluation of Stand-alone and On Grid Photovoltaic System using PVSYST Software. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, December 2012, vol. 5, no. 12, pp. 542–547.
3. Jaydeep V.R. Performance Evaluation of Grid-Connected Solar Photovoltaic Plant Using PVSYST Software. *Journal of emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, February 2015, vol. 2, no. 2, pp. 372–378.

4. Rekhashree Dr. J.S Rajashekar, Dr.H. Naganagouda. Study on Design and Performance Analysis of Solar PV Rooftop Stand alone and On Grid System Using PVSYSY. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2018, vol. 05, no. 07, pp. 41–48.
5. Kandasamy C.P., Prabu Niruba P.K. Solar Potential Assessment Using PVSYSY Software. *2013 International Conference on Green Computing, Communication and Conservation of Energy (ICGCE), Chennai, India*. 2013, pp. 667–672. DOI: 10.1109/ICGCE.2013.6823519
6. PVsyst. Available at: <https://www.pvsyst.com/> (accessed 02.02.2020).
7. METEONORM 7.2. Available at: <https://aiguasol.coop/energy-software/meteonorm-7-2-global-weather-data/> (accessed 26.02.2020).
8. Suresh P., Jaimol T. Performance Analysis of Stand-alone PV Systems Under Non-Uniform Operating Conditions Using PVsyst. *Advanced Research in Electrical and Electronic Engineering*, 2014, vol. 1, no. 4, pp. 19–25. Available at: <http://www.krishisanskriti.org/areee.html>.
9. W. Margaret Amutha, Rajini V. Techno-economic evaluation of various hybrid power systems for rural telecom. *Renewable Energy*, March 2015, vol. 43, pp. 553–561. DOI: 10.1016/j.rser.2014.10.103
10. Tzen E., Perrakis K., Baltas P. Design of a stand-alone PV-desalination system for rural. *Desalination*, 20 September 1998, vol. 119, no. 1–3, pp. 327–333. DOI: 10.1016/S0011-9164(98)00177-5
11. Galvin E. Chan P.K.W., Armstrong S., Hurley W.G. A stand-alone photovoltaic supercapacitor battery hybrid energy storage system. *13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008)*, Poznan, Poland, September 2008, pp. 1688–1695. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2008.4635510
12. Karki P., Adhikary B., Sherpa K., et al. Comparative study of grid-tied photovoltaic (PV) system in Kathmandu and Berlin using PVsyst. *2012 IEEE Third International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)*. Kathmandu, Nepal, 26 November 2012, pp. 196–199. DOI: 10.1109/ICSET.2012.6357397
13. Irwan Y.M., Amelia A.R., Irwanto M. Stand-Alone Photovoltaic (SAPV) System Assessment using PVSYSY Software. *Energy Procedia*, November 2015, vol. 79, pp. 596–603. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.539
14. Ramaprabha R., Badrilal L. Mathur Impact of Partial Shading on Solar PV Module Containing Series Connected Cells. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, November 2009, vol. 2, no. 7, pp. 56–60.
15. PVCDROM. Available at: <https://www.pveducation.org/pvcdrom> (accessed 01.23.2020).
16. Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б. Исследование температуры поверхности солнечных модулей с использованием голографической защиты от перегрева. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. Уфимский государственный нефтяной технический университет УГНТУ. 2019. – Т. 15, № 4. С. 19–29. [Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B. Study of the surface temperature of solar modules using holographic protection against overheating. *Electrical and information systems and systems*. Ufa State Oil Technical University USOTU, 2019, vol. 15, no. 4, pp. 19–29. (in Russ.)]
17. Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B., Madiyar Zh., Abdulloev I.T., et al. Study of the Operation of Solar Modules Using Holographic Thermal Protection. *International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2019)*, 18 December 2019, vol. 140, pp. 1–5. DOI: 10.1051/e3sconf/201914011010
18. Armstrong S., Glavin M.E., Hurley W.G. Comparison battery charging algorithms for stand-alone photovoltaic system. *Conference Paper in PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, July 2008, pp. 1469–1475. DOI: 10.1109/PESC.2008.4592143
19. Nallapaneni M.K., Kumar M.R., Rejoice P.R. Mathew Performance analysis of 100 kWp grid connected Si-poly photovoltaic system using PVsyst simulation tool. *Energy Procedia*, 2–4 March 2017, vol. 117, pp. 180–189. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.05.121
20. Irwan Y.M. Amelia A.R., Irwanto M., Fareq M., Leow W.Z. et al. Stand-Alone Photovoltaic (SAPV) System Assessment using PVSYSY Software. *Energy Procedia*, 2015, vol. 79, pp. 596–603. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.539
21. Suresh P., Jaimol T. Performance Analysis of Stand-alone PV Systems Under Non-Uniform Operating Conditions Using PVsyst Jaimol Thoma. *Advanced Research in Electrical and Electronic Engineering*, 2014, vol. 1, no. 4, pp. 29–33 Available at: <https://ru.scribd.com/document/375032277/03-Jul-20150307397>.

**Кирпичникова Ирина Михайловна**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; kirpichnikovaim@mail.ru.

**Махсумов Илхом Бурхонович**, аспирант кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; messi.ilhom@gmail.com.

Поступила в редакцию 13 мая 2020 г.

### USING PVsyst TO SELECT ELECTRICAL EQUIPMENT FOR A PHOTOVOLTAIC SYSTEM

*I.M. Kirpichnikova, kirpichnikovaim@mail.ru*

*I.B. Makhsumov, messi.ilhom@gmail.com*

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

Solar energy is on the rise, and it incentivizes the construction of new solar farms, which have to be designed, modeled, and equipped appropriately if they are to operate reliably and efficiently. This paper discusses step-by-step modeling of an autonomous solar farm to deliver electricity to households in a hard-to-reach unelectrified region in the Republic of Tajikistan; the modeling approach uses PVsyst, a software suite designed to analyze and simulate photovoltaic systems. The paper describes the principles behind this software as well as the stages and structure of modeling.

Photovoltaic system performance assessment was based on such factors as geographical location, panel orientation, mounting structure, and climate. The program and the daily load curve helped select the basic solar farm equipment: a controller, a photovoltaic module, energy storage units, and a backup power source. The researchers built a 3D model of the facility using the horizon graph and the shading chart. The performance ratio and the solar energy percentage, both being the efficiency metrics, were high for the system.

*Keywords: solar energy, PVsyst, autonomous photovoltaic system, solar farm equipment, performance ratio.*

*Received 13 May 2020*

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Кирпичникова, И.М. Выбор электрооборудования автономной фотоэлектрической системы с использованием программного обеспечения PVsyst / И.М. Кирпичникова, И.Б. Махсумов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 77–88. DOI: 10.14529/power200207

#### FOR CITATION

Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B. Using PVsyst to Select Electrical Equipment for a Photovoltaic System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 77–88. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200207

---