

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. И. РАЗЗАКОВА**

Кафедра «Возобновляемые источники энергии»

**РАЗРАБОТКА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЖИЛОГО ДОМА**

Методические указания для выполнения курсового проекта
по дисциплине «Фотоэлектрические преобразователи»
для студентов энергетического факультета
по специальности «Альтернативные источники энергии»
очной и заочной форм обучения

Бишкек - 2011

«Рассмотрено»
на заседании кафедры
«Возобновляемые источники энергии»
Протокол № 7 от 14.04.2011 г.

«Одобрено»
Методическим советом
энергетического факультета
Протокол № 1 от 3.10.2011 г.

УДК 662.997

Составители: ТАГАЙМАТОВА А.А., ОБОЗОВ А.ДЖ.

Методика расчета фотоэлектрической станции для электроснабжения индивидуального жилого дома. Методические указания для выполнения курсового проекта по дисциплине «Фотоэлектрические преобразователи» для студентов энергетического факультета по специальности «Альтернативные источники энергии» очной и заочной форм обучения / КГТУ им. И.Раззакова; сост.: А.А.Тагайматова, А.Дж. Обозов. – Бишкек: ИЦ «Текник», 2011. – 23 с.

Методические указания содержат методику выполнения курсового проекта, контрольные вопросы и список рекомендуемых источников. Кроме того, в настоящем указании приведены краткие теоретические сведения о фотоэлектрических преобразователях и о принципе их работы.

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения.

Прил.: 4, рис.: 4, библиогр.: 10 наименов.

Рецензент к.т.н., проф. Рахимов К.Р.

Тех. редактор *Субанбердиева Н.Е.*

Подписано к печати 16.11.2011 г. Формат бумаги 60x84¹/₁₆.
Бумага офс. Печать офс. Объем 1,5 п.л. Тираж 50 экз. Заказ 375. Цена 26,7 сом.
Бишкек, ул. Сухомлинова, 20. ИЦ «Текник» КГТУ им. И.Раззакова, т.: 54-29-43
e-mail: beknur@mail.ru

Содержание

Цель и содержание работы.....	3
Общие сведения о фотоэлектрических преобразователях.....	3
Физический принцип работы солнечных элементов.....	6
Вольт-амперная характеристика солнечных элементов.....	7
Автономные фотоэлектрической системы	9
График нагрузки потребителя.....	9
Определение оптимального угла наклона солнечной панели.....	9
Определение среднемесячного количества солнечной энергии, поступающей на наклонную поверхность солнечной батареи.....	10
Разработка и создание фотоэлектрической системы	11
Расчет КПД фотоэлектрической системы	14
Эффективность фотоэлектрических преобразователей	15
Порядок выполнения курсового проекта.....	17
Контрольные вопросы.....	19
Рекомендуемая литература.....	20
Приложения.....	21

Цель и содержание работы

Целью курсового проекта является освоение принципа работы фотоэлектрических преобразователей, методов расчета фотоэлектрических станций (ФЭС), соединений солнечных модулей, определение графика нагрузки потребителя, подбор и соединение аккумуляторных батарей в соответствии с расчетами и заданными данными, а также расчет и определение основных характеристик элементов ФЭС.

Общие сведения о фотоэлектрических преобразователях

Энергия солнечной радиации может быть преобразована в электрический ток посредством солнечного элемента, состоящего из тонких пленок кремния или других полупроводниковых материалов. Фотоэлектрическая генерация энергии обусловлена пространственным распределением положительных и отрицательных носителей заряда при поглощении в полупроводнике электромагнитного излучения.

Кремний является наиболее изученным полупроводниковым материалом, он широко используется для преобразователей солнечной энергии, обладающих наибольшей надежностью и имеющих наиболее высокий КПД.

В настоящее время солнечные элементы изготавливаются на основе монокристаллического и поликристаллического кремния. Монокристаллические солнечные элементы имеют более высокий КПД. Наличие отдельных кристаллов в пластине кремния оказывает двойное влияние на характеристики элементов: кристаллы с низкой степенью ориентации препятствуют движению генерированных светом носителей заряда и воздействуют на свойства объединенной области, в которой образуется потенциальный барьер.

Отдельные фотоэлементы собирают в модули, состоящие из 3-5 колонок последовательно или параллельно соединенных элементов. Элементы располагают в инертном наполнителе между прозрачной передней крышкой, обычно изготовленной из пластика, не пропускающего ультрафиолетовое излучение, и пластиной с тыльной стороны, которая должна быть достаточно прочной и иметь низкое термическое сопротивление. Крышка должна быть герметически запаяна и водонепроницаема при любых внешних воздействиях, включая термические нагрузки.

Простейшая конструкция солнечного элемента показана на рис.1. На малой глубине от поверхности кремниевой пластины p -типа сформирован p - n – переход с тонким металлическим контактом. На тыльную сторону пластины нанесен сплошной металлический контакт.

Если в полупроводниковый материал высокой чистоты вносить малые количества соответствующих примесей, то можно изменять его энергетические свойства и получать полупроводниковые материалы с электропроводностью двух основных типов:

1. p -типа со связанными носителями отрицательного заряда и свободными носителями положительного заряда;

2. n -типа со связанными носителями положительного заряда и свободными носителями отрицательного заряда

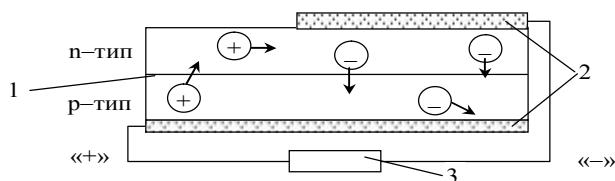


Рис. 1. Конструкция простейшего солнечного элемента
1 – спай; 2 – металлический контакт; 3 – сопротивление нагрузки

Если в одном кристалле полупроводника создать слои двух указанных типов и осветить поверхность кристалла солнечными лучами, то носители будут диффундировать через $p-n$ – переход навстречу друг другу, вызывая во внешней цепи электрический ток.



Рис. 2. Фотоэлектрический преобразователь

Типы фотоэлектрических элементов:

- Монокристаллические кремниевые;
- Поликристаллические кремниевые;
- Тонкоплёночные аморфные.

Преимущество фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) обусловлено отсутствием подвижных частей, их высокой надежностью и стабильностью (рис. 2). При этом срок их службы практически не ограничен. Они отличаются простотой и могут преобразовывать как прямую, так и рассеянную солнечную радиацию. Небольшая масса, простота обслуживания, модульный тип конст-

рукции позволяет создавать установки любой мощности и делает их весьма перспективными. К недостаткам ФЭП можно отнести высокую стоимость и сравнительно низкий КПД.

Солнечные батареи используют для энергоснабжения автономных потребителей малой мощности, питания радионавигационной и маломощной радиоэлектронной аппаратуры, привода экспериментальных электромобилей и самолётов. На рис. 3 приведен общий вид дома с индивидуальной системой энергоснабжения.



Рис. 3. Жилой дом с автономной системой энергоснабжения

Физический принцип работы солнечных элементов

Преобразование энергии в ФЭП основано на фотоэлектрическом эффекте, который возникает в неоднородных полупроводниковых структурах при воздействии на них солнечного излучения.

Неоднородность структуры ФЭП может быть получена легированием одного и того же полупроводника различными примесями (создание *p-n* переходов) или путём соединения различных полупроводников с неодинаковой шириной запрещённой зоны - энергии отрыва электрона из атома (создание гетеропереходов), или же за счёт изменения химического состава полупроводника, приводящего к появлению градиента ширины запрещённой зоны (создание варизонных структур). Возможны также различные комбинации перечисленных способов.

Эффективность преобразования зависит от электрофизических характеристик неоднородной полупроводниковой структуры, а также оптических свойств ФЭП, среди которых наиболее важную роль играет фотопроводимость.

Она обусловлена явлениями внутреннего фотоэффекта в полупроводниках при облучении их солнечным светом.

Основные необратимые потери энергии в ФЭП связаны с:

- отражением солнечного излучения от поверхности преобразователя;
- прохождением части излучения через ФЭП без поглощения в нём;
- рассеянием на тепловых колебаниях решётки избыточной энергии фотонов;
- рекомбинацией образовавшихся фото-пар на поверхностях и в объёме ФЭП;
- внутренним сопротивлением преобразователя;
- и некоторыми другими физическими процессами.

Для уменьшения всех видов потерь энергии в ФЭП разрабатываются и успешно применяются различные мероприятия, такие как:

- использование полупроводников с оптимальной для солнечного излучения шириной запрещённой зоны;
- направленное улучшение свойств полупроводниковой структуры путём её оптимального легирования и создания встроенных электрических полей;
- переход от гомогенных к гетерогенным и варизонным полупроводниковым структурам;
- оптимизация конструктивных параметров ФЭП (глубины залегания *p-n* перехода, толщины базового слоя, частоты контактной сетки и др.);
- применение многофункциональных оптических покрытий, обеспечивающих просветление, терморегулирование и защиту ФЭП от космической радиации;
- разработка ФЭП, прозрачных в длинноволновой области солнечного спектра за краем основной полосы поглощения.

Вольт–амперная характеристика солнечного элемента

Солнечное излучение характеризуется высокой плотностью фотонов, поэтому поглощение его полупроводниковыми материалами может резко увеличить скорость возникновения электронно-дырочных пар. Если генерация носителей происходит вблизи *p-n*-перехода, то под воздействием контактного поля происходит пространственное разделение зарядов и возникает фото–ЭДС, которая приводит к появлению тока в замкнутой внешней цепи.

Для того, чтобы найти обобщенное выражение для вольт-амперной характеристики освещенного *p-n* – перехода предположим, что к нему подключен источник питания с варьируемым напряжением. При положительном напряжении смещения фототок I_{ϕ} вычитается из «темнового» тока *p-n* – перехода, а при отрицательном – суммируется с ним.

Выражение для вольт–амперной характеристики записывается в виде:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{A \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - I_{\phi} \quad (1)$$

где I_0 – ток насыщения;

q – величина заряда электрона, $1,6 \cdot 10^{19}$ Кл;

k – постоянная Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К = $0,86 \cdot 10^{-4}$ эВ/К;

T – абсолютная температура;

I_{ϕ} – ток, индуцированный фотонами;

A – параметр вольт-амперной характеристики $p-n$ – перехода, меняющийся по следующему закону:

$$A = 0.434 \frac{q}{kT} \Delta U, \quad (2)$$

где ΔU – приращение напряжения при приращении плотности тока (или абсолютного значения тока).

Направление тока в нагрузке всегда совпадает с направлением I_{ϕ} , а сам ток нагрузки I_n равен результирующему току через $p-n$ – переход. Принимая направление тока I_{ϕ} за положительное можно записать:

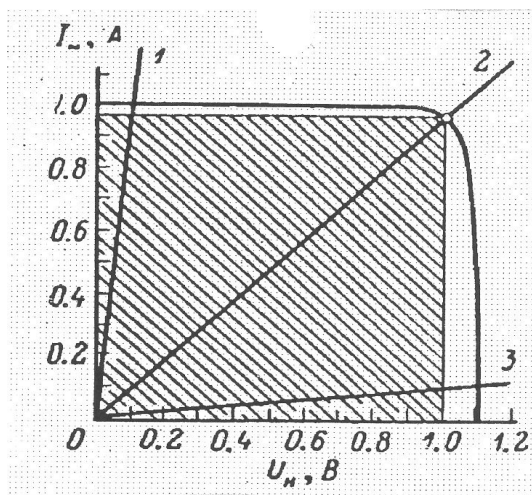
$$I_i = I_{\phi} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qU_i}{A \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right], \quad (3)$$

здесь U_n – напряжение на нагрузке, равное напряжению на $p-n$ – переходе.

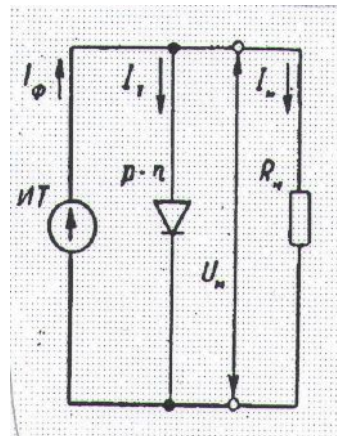
Выражение (3) описывает нагрузочную вольт-амперную характеристику освещенного $p-n$ – перехода. Нагрузочная ВАХ $p-n$ – перехода для значения фототока $I_{\phi} = 1 \text{ А}$ изображена на рис. 4, а), на этом же рисунке изображены ВАХ омических сопротивлений нагрузки

$$I_i = \frac{U_i}{R_i}, \quad (4)$$

Для $R_{n1} = 0,1 \text{ Ом}$, $R_{n2} = 1,026 \text{ Ом}$ и $R_{n3} = 10 \text{ Ом}$.



а)



б)

Рис. 4. а) нагрузочная ВАХ $p-n$ – перехода и характеристики R_n при значениях 0,1 (1), 1,026 (2) и 10 Ом (3);

б) эквивалентная схема освещенного $p-n$ – перехода с сопротивлением нагрузки

При известных параметрах нагрузочной ВАХ (3) и заданном значении R_n величины I_n и U_n находятся методом последовательных приближений при совместном решении (3) и (4), или графически, как это сделано на рис. 4, а).

Таким образом, освещенный $p-n$ – переход в соответствии с выражением (3) может быть представлен в виде эквивалентной схемы (рис. 4, б). Здесь источник тока имитирует генерацию постоянного фототока, не зависящего от напряжения $p-n$ – перехода. При варьировании R_n фототок перераспределяется между нагрузкой и $p-n$ – переходом.

Электрическая мощность, выделяемая в нагрузке, определяется по формуле (пренебрегаем единицей в формуле (3)):

$$P = I_i U_i = I_o U_i - I_o U_i \exp\left(\frac{qU_i}{AkT}\right), \quad (5)$$

В режимах короткого замыкания и холостого хода $P = 0$, поскольку либо U_n , либо I_n равны нулю.

Автономные ФЭС

Фотоэлектрические системы могут быть автономными или работающими параллельно с централизованной сетью электроснабжения.

Автономные ФЭС используются там, где нет централизованных сетей электроснабжения для электроснабжения отдельных домов. Система состоит из солнечной панели для преобразования солнечной энергии в электрическую, аккумуляторной батареи для обеспечения питания в темное время суток или в пасмурные дни, электрических кабелей и нагрузки потребителя.

График нагрузки потребителя

Для определения нагрузки потребления составляется список приборов использующих электроэнергию, которые будут питаться от ФЭС. Определяется потребляемая мощность их работы по каталогу для бытовой техники и строится график суточной нагрузки.

Определение оптимального угла наклона солнечной панели

Для обеспечения наиболее эффективной работы солнечных элементов необходимо выбрать угол их наклона. Величина оптимального угла наклона к горизонту может быть определена по формуле:

$$\beta = \varphi \pm \delta_{\text{нб}}, \quad (6)$$

где α – угол наклона солнечной панели к горизонту, град.;

φ – широта местности, град.;

δ – средняя величина угла склонения солнца за период работы установки, град.

$$\delta_{\text{ср}} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2}, \quad (7)$$

где δ_1, δ_2 – минимальная и максимальная величина угла склонения за рассматриваемый период работы ФЭС, град.

Величина склонения солнца определяется по известной формуле Купера:

$$\delta = 23,45 \operatorname{Sin} \left(360 \frac{284 + n}{365} \right), \quad (8)$$

где n – порядковый номер дня года.

Определение среднемесячного суммарного количества солнечной энергии, поступающей на наклонную поверхность солнечной батареи

Коэффициент пересчета R количества солнечной энергии с горизонтальной поверхности на наклонную поверхность солнечной батареи с южной ориентацией равен сумме трех составляющих, соответствующих прямому, рассеянному и отраженному солнечному излучению:

$$R = \left(1 - \frac{\dot{Y}_a}{\dot{Y}} \right) \cdot R_r + \frac{\dot{Y}_a}{\dot{Y}} \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (9)$$

где ρ - коэффициент отражения (альбедо) поверхности Земли и окружающих тел, обычно принимаемый равным 0,7 для зимы и 0,2 для лета;

\dot{Y} – приход солнечной радиации на горизонтальную поверхность;

R_r – коэффициент пересчета прямой солнечной радиации с горизонтальной поверхности на наклонную;

\dot{Y}_d – приход диффузной солнечной радиации;

β – угол наклона солнечной панели.

Данные по поступлению солнечного излучения для г. Бишкек приведены в приложении.

Среднемесячный коэффициент пересчета прямого солнечного излучения для поверхности наклонной солнечной батареи имеет вид:

$$R_r = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_{ci} + \frac{\pi}{180} \cdot \omega_{ci} \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta \sin \omega_c + \frac{\pi}{180} \cdot \omega_c \sin \varphi \cdot \sin \delta}, \quad (10)$$

где: φ - широта местности, град.;

β - угол наклона солнечной батареи к горизонту, град.;

δ - склонение Солнца в средний день месяца, град.

Часовой угол захода (восхода) Солнца для горизонтальной поверхности:

$$\omega_z = \arccos(-\operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{tg}\delta), \quad (11)$$

В качестве часового угла захода Солнца для наклонной поверхности с южной ориентацией принимают меньшую из двух величин: ω_z или $\omega_{z.H}$, рассчитанную по формуле:

$$\omega_{zi} = \arccos[-\operatorname{tg}(\varphi - \beta) \cdot \operatorname{tg}\delta], \quad (12)$$

Угол склонения Солнца δ для среднего дня месяца рассчитывается по формуле (8).

Среднемесячное дневное суммарное количество солнечной энергии, поступающей на наклонную поверхность солнечной батареи \mathcal{E}_H , определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_H = R \cdot \mathcal{E} \quad (13)$$

Разработка и создание фотоэлектрической системы

Использовать энергию солнечных элементов можно также как и энергию других источников питания, с той разницей, что солнечные элементы не боятся короткого замыкания. Каждый из них предназначен для поддержания определенной силы тока при заданном напряжении. Но в отличие от других источников тока характеристики солнечного элемента зависят от количества падающего на его поверхность света. Например, набежавшее облако может снизить выходную мощность более чем на 50%. Кроме того отклонения в технологических режимах влекут за собой разброс выходных параметров элементов одной партии. Следовательно, желание обеспечить максимальную отдачу от фотоэлектрических преобразователей приводит к необходимости сортировки элементов по выходному току. Для объяснения характеристик элемента можно пользоваться простыми для понимания кривых - вольтамперных характеристик (ВАХ) солнечных элементов.

Напряжение холостого хода, генерируемое одним элементом, слегка изменяется при переходе от одного элемента к другому в одной партии и составляет около 0.6 В. Эта величина, не зависит от размеров элемента. По иному обстоит дело с током. Он зависит от интенсивности света и размера элемента, под которым подразумевается площадь его поверхности.

Элемент размером 100×100 мм в 100 раз превосходит элемент размером 10×10 мм и, следовательно, он при той же освещенности выдаст ток в 100 раз больший.

Батареи можно составлять в любой желаемой комбинации. Простейшей батареей является цепочка из последовательно включенных элементов. Можно также соединить параллельно цепочки, получив так называемое последовательно-параллельное соединение.

Важным моментом работы солнечных элементов является их температурный режим. При нагреве элемента на один градус свыше 25°C он теряет в напряжении $0,002\text{В}$, т.е. $0,4\%$ /град.

В яркий солнечный день элементы нагреваются до $60-70^{\circ}\text{C}$ теряя $0,07-0,09\text{В}$ каждый. Это и является основной причиной снижения КПД солнечных элементов, приводя к падению напряжения, генерируемого элементом.

КПД обычного солнечного элемента колеблется в пределах $10-16\%$. Это значит, что элемент размером 100×100 мм при стандартных условиях может генерировать $1-1,6$ Вт.

Все фотоэлектрические системы можно разделить на два типа: автономные и соединенные с электрической сетью. Станции второго типа отдают излишки энергии в сеть, которая служит резервом в случае возникновения внутреннего дефицита энергии.

Автономная система в общем случае состоит из набора фотомодулей, размещенных на опорной конструкции или на крыше, аккумуляторной батареи, контроллера разряда - заряда аккумулятора, соединительных кабелей. Фотомодули являются основным компонентом для построения фотоэлектрических систем. Они могут быть изготовлены с любым выходным напряжением.

После того как солнечные элементы подобраны - их необходимо спаять. Серийные элементы снабжены токосъемными сетками для припайки к ним проводников. Батареи можно составлять в любой комбинации.

Простейшей батареей является цепочка из последовательно соединенных элементов.

Можно соединить эти цепочки параллельно, получив так называемое последовательно-параллельное соединение. Параллельно можно соединять лишь цепочки (линейки) с идентичным напряжением, при этом их токи согласно закону Кирхгофа суммируются.

При наземном использовании они обычно используются для зарядки аккумуляторных батарей с номинальным напряжением 12В . В этом случае, как правило, 36 солнечных элементов соединяются последовательно и герметизируются посредством ламинации на стекле, текстолите, алюминии. Элементы при этом находятся между двумя слоями герметизирующей пленки, без воздушного зазора. Технология вакуумной ламинации позволяет выполнить это требование. В случае воздушной прослойки между защитным стеклом и элементом, потери на отражение и поглощение достигли бы $20-30\%$ по сравнению с 12% - без воздушной прослойки.

Точка пересечения кривой с осью напряжений называется напряжением холостого хода - U_{xx} , точка пересечения с осью токов – током короткого замыкания $I_{кз}$.

Напряжение, соответствующее максимальной мощности, называется напряжением максимальной мощности (рабочим напряжением - U_p), а соответствующий ток - током максимальной мощности (рабочим током - I_p).

Следует заметить, что напряжение холостого хода модуля мало зависит от освещенности, в то время как ток короткого замыкания, а соответственно и рабочий ток, прямо пропорциональны освещенности.

Таким образом, при нагреве в реальных условиях работы, модули разогреваются до температуры 60-70°C, что соответствует смещению точки рабочего напряжения, к примеру, для модуля с рабочим напряжением 17 В - со значения 17 В до 13,7-14,4 В (0,38-0,4 В на элемент).

Исходя из всего вышесказанного, и надо подходить к расчету числа последовательно соединенных элементов модуля.

Если потребителю необходимо иметь переменное напряжение, то к этому комплекту добавляется инвертор-преобразователь постоянного напряжения в переменное.

Под расчетом понимается определение номинальной мощности модулей, их количества, схемы соединения; выбор типа, условий эксплуатации и емкости аккумуляторной батареи; мощностей инвертора и контроллера заряда-разряда; определение параметров соединительных кабелей.

Прежде всего, надо определить суммарную мощность всех потребителей, подключаемых одновременно. Мощность каждого из них измеряется в ваттах и указана в паспортах изделий. На этом этапе уже можно выбрать мощность инвертора, которая должна быть не менее чем в 1,25 раза больше расчетной. Следует иметь в виду, что такой хитрый прибор как компрессорный холодильник в момент запуска потребляет мощность в 7 раз больше паспортной. Номинальный ряд инверторов 150, 300, 500, 800, 1500, 2500, 5000 Вт. Для мощных станций (более 1кВт) напряжение станции выбирается не менее 48В, т.к. на больших мощностях инверторы лучше работают с более высоких исходных напряжений.

Следующий этап - это определение емкости аккумуляторной батареи (АКБ). Емкость АКБ выбирается из стандартного ряда емкостей с округлением в сторону, большую расчетной. А расчетная емкость получается простым делением суммарной мощности потребителей на произведение напряжения АКБ на значение глубины разряда аккумулятора в долях.

Например, если суммарная мощность потребителей 1000 Вт·ч в сутки, а допустимая глубина разряда АКБ 12В - 50 %, то расчетная емкость составит: $1000 / (12 \times 0,5) = 167 \text{ А}\cdot\text{ч}$.

При расчете емкости АКБ в полностью автономном режиме необходимо принимать во внимание и наличие в природе пасмурных дней, в течение которых аккумулятор должен обеспечивать работу потребителей.

Последний этап - это определение суммарной мощности и количества солнечных модулей. Для расчета потребуется значение солнечной радиации,

которое берется в период работы станции. В приложении даны месячные и суммарные годовые значения солнечной радиации для г. Бишкек.

Взяв оттуда значение солнечной радиации за интересующий период и разделив его на 1000, получим так называемое количество пикочасов, т.е., условное время, в течение которого солнце светит как бы с интенсивностью 1000 Вт/м².

Модуль мощностью P_w в течение выбранного периода выработает следующее количество энергии:

$W = k P_w E / 1000$, где E - значение инсоляции за выбранный период, k - коэффициент равный 0,5 летом и 0,7 в зимний период.

Этот коэффициент делает поправку на потерю мощности солнечных элементов при нагреве на солнце, а также учитывает наклонное падение лучей на поверхность модулей в течение дня.

Разница в его значении зимой и летом обусловлена меньшим нагревом элементов в зимний период.

Исходя из суммарной мощности потребляемой энергии и приведенной выше формулы - легко рассчитать суммарную мощность модулей. А, зная ее, простым делением ее на мощность одного модуля, получим количество модулей.

При создании ФЭС настоятельно рекомендуется максимально снизить мощность потребителей. Например, в качестве осветителей использовать (по возможности) только люминесцентные или энергосберегающие лампы. Такие светильники, при потреблении в 5 раз меньшем, обеспечивают световой поток, эквивалентный световому потоку лампы накаливания.

Для небольших фотоэлектрических систем целесообразно устанавливать ее модули на поворотном кронштейне для оптимального разворота относительно падающих лучей. Это позволит увеличить мощность станции на 20-30 %.

Расчет к.п.д. фотоэлектрической системы

Коэффициент полезного действия ФЭС η определяется отношением мощности P выделяемой ФЭС к падающему солнечному излучению \dot{E}_n :

$$\eta = \frac{I_i U_i}{\dot{Y}_i}, \quad (14)$$

Значение к.п.д. ФЭС определяется потерями энергии, зависящими от применяемых материалов и конструкции фотоэлемента, а также выбором режима работы ФЭС (сопротивлением нагрузки R_n , освещенностью Φ (лм) и температурой). Потери энергии при преобразовании излучения в электрическую энергию, выделяющуюся на нагрузке ФЭС, могут быть подразделены на *световые* и *энергетические* потери.

Световые потери - это все потери на отражение светового потока Φ от поверхности ФЭС, зависящие от длины волны падающего света.

Энергетические потери - потери количества возбужденных светом пар электронов и дырок или переносимой ими энергии. Эти потери обусловлены рекомбинацией носителей, не дошедших до *p-n* - перехода, и зависят от конструкции ФЭС, толщины наружного слоя полупроводника и состояния его поверхности. Кроме того, если энергия квантов света значительно превышает ширину запрещенной зоны ($h\nu \gg \Delta E$), то избыточная часть поглощенной энергии ($h\nu - \Delta E$) растрачивается на нагревание фотоэлементов.

При нахождении к.п.д. ФЭС в видимой части спектра приближенно можно считать, что $1 \text{ лм} = 1 / 683 \text{ Вт}$, тогда выражение для η можно записать в виде:

$$\eta = \frac{683 \cdot I_i U_i}{\Phi S}, \quad (15)$$

где Φ - освещенность ФЭС, лм;

S - площадь освещаемой части фотоэлементов ФЭС, м².

Эффективность фотоэлектрических преобразователей

Произведем оценку экономической эффективности применения солнечной электростанции (ФЭС), построенной на базе фотоэлектрических преобразователей.

Определяем критерий рационального режима работы ФЭС (круглогодичный или сезонный):

$$\hat{e}_{\text{дл}} = \frac{\hat{A}_{\text{дл}}}{\hat{A}_{\text{дл}}}, \quad (16)$$

где $E_{\text{год}}$ – средние годовые суммы суммарной радиации на горизонтальную поверхность;

$E_{\text{мес}}$ – среднемесячная сумма суммарной радиации на горизонтальную поверхность.

Определяем общее количество электроэнергии, которое может выработать один солнечный модуль:

$$W_i = \frac{k \cdot D_i \cdot A}{1000}, \quad (17)$$

где E – значение солнечной радиации за выбранный период;

P_m – мощность фотомодуля;

$k = 0,5$ коэффициент, учитывающий поправку на потерю мощности солнечных элементов при нагреве на солнце, а также наклонное падение лучей на поверхность модулей в течение дня.

Полная мощность модулей ФЭС определяется из выражения:

$$D_{\text{дл}} = \frac{30 \cdot W}{W_i} D_i, \quad (18)$$

где W – среднесуточное потребление электроэнергии объектом электроснабжения.

Полная стоимость комплектного оборудования ФЭС определяется как:

$$\hat{E}_{\acute{o}\grave{n}\grave{o}} = \hat{E}_{\acute{o}\grave{n}\grave{o}.\acute{o}\grave{a}} \cdot \mathcal{D}_{\acute{o}\grave{y}\tilde{N}} , \quad (19)$$

Стоимость строительных работ приближенно определяется с помощью коэффициента затрат на установку станции:

$$\hat{E}_{\grave{n}\grave{o}\delta} = \hat{e}_{\delta} \cdot \hat{E}_{\acute{o}\grave{n}\grave{o}} , \quad (20)$$

где $k_p = 0,04$, затраты на строительные и монтажные работы определяются для любой местности.

Эксплуатационные расходы на ремонт:

$$\tilde{N}_{\acute{o}\grave{a}\grave{i}} = \delta_i \cdot (\hat{E}_{\acute{o}\grave{n}\grave{o}} + \hat{E}_{\grave{n}\grave{o}\delta}) , \quad (21)$$

где p_n – коэффициент затрат равный 0,2.

Приведенные годовые затраты на 1кВт установленной мощности системы электроснабжения, определяются из выражения:

$$C = \frac{\delta_i \cdot (\hat{E}_{\acute{o}\grave{n}\grave{o}} + \tilde{N})}{\mathcal{D}} , \quad (22)$$

где P – установленная мощность объекта электроснабжения;

C – общие годовые эксплуатационные расходы.

Себестоимость 1кВтч электроэнергии, вырабатываемой ФЭС, можно определить как:

$$C_{y\grave{e}} = \frac{\delta_i \cdot (\hat{E}_{\acute{o}\grave{n}\grave{o}} + \tilde{N})}{W} , \quad (23)$$

где $W_i = \frac{k \cdot n \cdot \mathcal{D}_i \cdot A}{1000}$ - общее количество электроэнергии, вырабатываемое ФЭС в течение года;

P_m – пиковая мощность солнечного модуля;

n – общее количество модулей.

Срок окупаемости ФЭС определяется по формуле:

$$\dot{O} = \frac{\hat{E}_{\acute{o}\grave{n}\grave{o}}}{W_{\acute{a}\grave{i}\grave{a}} \cdot \tilde{N}_{y\grave{y}}} , \quad (24)$$

где $K_{уст}$ – полная стоимость комплектного оборудования;

$W_{\text{год}}$ – годовое количество электрической энергии, выработанное ФЭС;
 $C_{\text{ээ}}$ – тариф на электрическую энергию в месте установки станции.

Порядок выполнения курсового проекта

Проект выполняется в следующем порядке:

А. Определение нагрузки переменного и постоянного тока.

1. Определяется нагрузка переменного (постоянного) тока, ее номинальная мощность и число часов работы в сутки. Умножить мощность на число часов работы для каждого потребителя. Сложить получившиеся значения для определения суммарной потребляемой энергии переменного (постоянного) тока в сутки.
2. Подсчитать требуемую энергию переменного тока от аккумулятора. Для этого нужно умножить значение п. 1 на коэффициент $k = 1,2$, учитывающий потери в инверторе.
3. Определить значение входного напряжения инвертора по характеристикам выбранного инвертора. Обычно это 12В, 24В, 36В или 48В. Напряжение в системе постоянного тока определяется также.
4. Разделить значение п. 2 на значение п. 3, получится число Ампер-часов (А·ч) в сутки, требуемое для покрытия нагрузки переменного тока. Для нагрузки постоянного тока требуемое количество Ампер-часов в сутки определяется разделением значения п. 1 на значение п. 3 для постоянного тока.
5. Сложить значение нагрузки переменного и постоянного тока (п.4) для определения суммарной требуемой емкости аккумуляторной батареи.
6. Проводится анализ нагрузки, и попытаться максимально уменьшить потребляемую мощность. Это важно для системы электроснабжения жилого дома, т.к. экономия может быть очень существенной. Если есть нагрузка, которую нельзя исключить, рассматривается вариант, при котором можно будет включать ее только в солнечные периоды или только летом.

Б. Определение емкости аккумуляторной батареи.

1. Определить максимальное число последовательных дней «без солнца», т.е. когда солнечной энергии недостаточно для заряда аккумуляторной батареи из-за непогоды или облачности.
2. Умножить суточное потребление в А·ч (п. 5 А) на количество дней, определенных в предыдущем пункте.
3. Задать величину глубины допустимого разряда аккумуляторной батареи. Рекомендуется использовать от 20% до 30% разряда от значения номинальной емкости аккумуляторной батареи, т.е. принять коэффициент 0,2-0,3 в расчете и выборе аккумуляторной батареи. При этом нужно учесть, что ни при каких обстоятельствах разряд батареи не должен превышать 80%, это значит чем больше глубина разряда, тем быстрее аккумуляторные батареи выйдут из строя.
4. Разделить значение п. 2 на значение п. 3.

5. Выбрать коэффициент, который учитывает температуру окружающей среды в помещении, где установлены аккумуляторные батареи (прил. 2), который учитывает уменьшение емкости аккумуляторной батареи при понижении температуры.
6. Умножить п. 4 на коэффициент п. 5, чтобы получить общую требуемую емкость аккумуляторной батареи.
7. Разделить значение п. 6 на номинальную емкость выбранной аккумуляторной батареи, округлить и это будет количество батарей, которые будут соединены параллельно.
8. Разделить номинальное напряжение системы на номинальное напряжение выбранной аккумуляторной батареи, округлить и это будет количество батарей, которые будут соединены последовательно.
9. Умножив значения п. 7 и п. 8 получаем требуемое количество аккумуляторных батарей.

В. Определение угла наклона солнечных панелей к горизонту.

Г. Определение среднемесячного значения интенсивности солнечной радиации, падающей на наклонную поверхность солнечной панели. Полученное среднемесячное значение для текущего месяца нужно разделить на число дней в месяце и получить число «пиковых» солнце-часов, которое используется при расчете ФЭС.

Д. Определение общего количества модулей, необходимых для ФЭС.

1. Значение п. 5А нужно умножить на коэффициент 1,2 для учета потерь на аккумуляторные батареи.
2. Разделить полученное значение на среднее число «пиковых» солнце-часов в месте расположения ФЭС. Получится ток, который должен генерировать ФЭП.
3. Значение п. 2 разделить на P_p модуля, округлить, и получится число модулей, соединенные параллельно.
4. Разделить напряжение постоянного тока системы на номинальное напряжение модуля, округлить, и получится число модулей, соединенные последовательно.
5. Произведение чисел параллельно и последовательно соединенных модулей дает общее требуемое количество солнечных модулей в ФЭС.

Е. Определяются к.п.д. и экономическая эффективность ФЭС.

Исходные данные и варианты, необходимые для разработки ФЭС задаются преподавателем. Технические характеристики элементов ФЭС, показатели составляющих солнечной радиации и коэффициенты, необходимые для расчета принимаются из приложений, приведенных ниже.

Контрольные вопросы

1. Какие полупроводные материалы используются в ФЭП?
2. На каком принципе основана работа ФЭП?
3. Что такое фотоэлектрический модуль?
4. Какое влияние оказывает солнечная энергетика на окружающую среду?
5. Назовите основные составляющие солнечного излучения на земле и в космосе.
6. Что такое часовой угол солнца?
7. Дайте определение склонению солнца.
8. Как изменяется поток солнечной радиации в течение суток?
9. Как зависит интенсивность солнечной радиации в течение суток и года?
10. Как влияет атмосфера на солнечное излучение?
11. Что такое "оптимальная ориентация" приемника солнечного излучения на земле?
12. Назовите методы расчета солнечной радиации в течение суток и года.
13. С помощью, каких приборов измеряется солнечное излучение?
14. Назовите основные технические схемы использования солнечной энергии.
15. Что такое концентраторы солнечной энергии?
16. Что называют "вольтамперной характеристикой" СФЭС?
17. Дайте определение составляющих уравнения вольтамперной характеристики.
18. Как определить номинальную мощность СФЭС, имея вольтамперную характеристику?
19. Приведите энергетические схемы, поясняющие работу СФЭС: а) в режиме холостого хода; б) в режиме нагрузки; в) в режиме короткого замыкания.
20. Какие факторы влияют на к.п.д. СФЭС?
21. Объясните зависимость к.п.д. СФЭС от режимов ее работы.
22. Чем измеряется освещенность СФЭС?

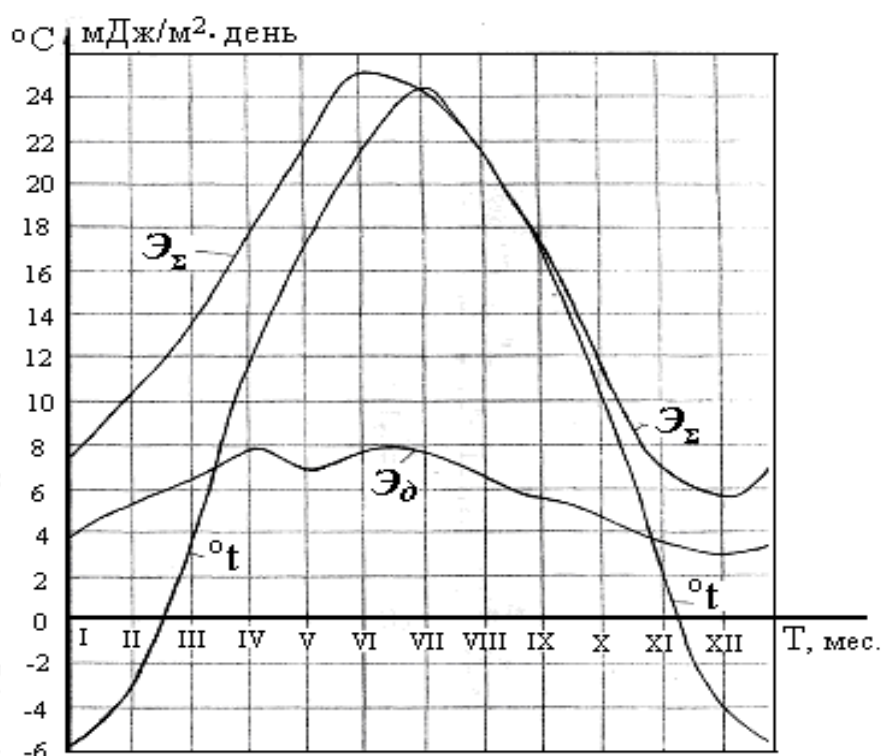
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Обрезков В.И. Возобновляемые нетрадиционные источники энергии. – М.: МЭИ, 1987.
3. Виссарионов В.И. и др. Методическое пособие по курсовому и дипломному проектированию по специальности "Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии". – М.: МЭИ. 1997.
4. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Андреев В.М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. – М.: Наука, 1989.
6. Виссарионов В.И. Энергетическое оборудование для использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. – М.: МЭИ, 2004.
7. Лукутин Б.И. Возобновляемые источники энергии. Томск, 2007.
8. Обозов А.Дж., Ботпаев Р.Р. Возобновляемые источники энергии. Бишкек, 2010.
9. Тагайматова А.А. Солнечная энергетика: методы расчета основных параметров солнечных установок. Бишкек, 2009.
10. Агеев В.А. нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. – М.: КТС, 2004.

Приложение 1

Данные по поступлению суммарного \mathcal{E}_Σ и диффузного (рассеянного) \mathcal{E}_D солнечного излучения на горизонтальную поверхность для г. Бишкек в МДж/м²

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
\mathcal{E}_Σ	7,56	10,13	12,28	17,37	21,6	25,16	24,3	21,73	17,37	11,61	7,09	5,8
\mathcal{E}_D	3,91	5,36	6,34	7,78	6,91	7,78	7,56	6,48	5,56	4,86	3,34	3,1
t°	-5,6	-3,2	3,8	11,4	16,9	21,3	24,1	22,6	17,3	10,1	2,2	-2,9



Графическая зависимость дневного поступления суммарной \mathcal{E}_Σ , рассеянной (диффузной) \mathcal{E}_D солнечной радиации и температуры t° по месяцам.

Приложение 2

Температурный коэффициент для аккумуляторной батареи

Температура в градусах		Коэффициент
Фаренгейта, F	Цельсии, °С	
80	26,7	1,00
70	21,2	1,04
60	15,6	1,11
50	10,0	1,19
40	4,4	1,30
30	-1,1	1,40
20	-6,7	1,59

Приложение 3

Фотоэлектрические модули с обычным стеклом

Тип ФЭМ	Рр, Вт	Ip, А	Up, В	Un, В	Ikз, А	Uхх, В	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Масса, кг
ФЭМ 5-12	5	0,3	17	12	0,4	21,6	305	208	28	1,1
ФЭМ 11-12	11	0,64	17	12	0,8	21,6	410	360	28	1,8
ФЭМ 12-12	12	0,7	17	12	0,9	21,6			28	1,8
ФЭМ 16-12	16	0,94	17	12		21,6			28	2
ФЭМ 21-12	21	1,24	17	12		21,6	572	428	28	3
ФЭМ 24-12	24	1,41	17	12		21,6	572	428	28	3
ФЭМ 30-12	30	1,76	17	24	2,1	21,6			28	3,7
ФЭМ 40-12	40	2,35	17	12	2,8	21,6	1065	415	28	4
ФЭМ 60-12	60	3,5	17	20	4,2	21,6	1185	550	28	7,7
ФЭМ 65-12	65	3,82	17	20	4,3	21,6	1185	550	28	7,7

Солнечные фотоэлектрические модули в алюминиевой рамке

Тип	Рр, Вт	Ip, А	Up, В	Un, В	Ikз, А	Uхх, В	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Масса, кг
ФЭМ 6-12	6	0,36	17	12	0,4	21,6	303	218	38	1,1
ФЭМ 12-12	12	0,71	17	12	0,78	21,6	421	282	38	1,8
ФЭМ 24-12	24	1,41	17	12	1,58	21,6	552	415	38	3,0
ФЭМ 38-12	38	2,24	17	12	2,51	21,4	630	534	38	4,5
ФЭМ 40-12	40	2,35	17	12	2,76	21,6	644	600	38	4,1
ФЭМ 75-12	75	4,4	17	12	5,19	21,6	1185	550	38	7,7
ФЭМ 80-12	80	2,36	34	24	2,71	43,2	1212	600	38	11,7
ФЭМ 120-12	120	7,06	17	12	8,4	21,6	1411	691	38	11,7
ФЭМ 200-12	200	7,14	28	20	8,2	36	1640	960	38	15

Элементы электрооборудования ФЭС. Инверторы (ББП)

Название оборудования	Вес, кг	Название оборудования	Вес, кг
Блок бесперебойного питания «Синус-М» 1700 ВА	16,00	Блок бесперебойного питания «OutBack VFX 3048E-CE»	30,00
Блок бесперебойного питания «Синус-М» 3000 ВА	16,00	Блок бесперебойного питания «Traco SW 4548E»	63,00
Блок бесперебойного питания «Синус-Т» 3000 ВА	22,00	Блок бесперебойного питания «Xantrex SW 4548E»	63,00
Блок бесперебойного питания «Синусоида» 1700 ВА	16,00	Блок бесперебойного питания «Xantrex SW 3048E»	50,00
Блок бесперебойного питания «Синусоида» 3000 ВА	20,00	Инвертор «Синус 1,2» 1200 ВА	12,00
Блок бесперебойного питания «Синусоида» 5000 ВА	40,00	Инвертор «Синус» 1700 ВА	15,00
Блок бесперебойного питания «Синусоида» 7000 ВА	60,00	Инвертор «Синус» 3000 ВА	19,00
Блок бесперебойного питания «OutBack FX2024ET»	30,00	Инвертор «Синус» 5000 ВА	40,00
Блок бесперебойного питания «OutBack FX2348ET»	30,00	Инвертор «Синус» 7000 ВА	60,00
Блок бесперебойного питания «OutBack VFX 3024E-CE»	30,00	Системный контроллер	0,50

