

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
НА БАЗЕ СОЛНЕЧНОГО МОДУЛЯ ФСМ 50-12**

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы по дисциплине  
**Общая энергетика**

Томск 2023

# ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ СОЛНЕЧНОГО МОДУЛЯ ФСМ 50-12.

## Цель работы

Исследовать вольтамперную характеристику солнечного модуля при различных уровнях освещенности. На основании полученных данных проанализировать работу автономной системы электроснабжения.

## КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Введение

Солнечное излучение – один из наиболее перспективных источников энергии. Интерес к *возобновляемым* источникам энергии значительно возрос после 70-х годов. Истощение запасов природных *невозобновляемых* источников энергии (нефть, газ, уголь и уран) и экологическая опасность от эксплуатации атомных и теплоэлектростанций способствовали этому. К возобновляемым источникам энергии, прежде всего, относятся: солнечная энергия, энергия ветра, гидроэнергия, энергия биомассы. Преобразование солнечной энергии в доступные для использования виды осуществляется двумя способами: фотоэлектрическим (прямое преобразование световой энергии в электрическую) и фототермическим (преобразование световой энергии в тепловую, а затем при необходимости, например, с помощью пара, в электрическую). Первыми переносными устройствами, использующими энергию солнца, были портативные калькуляторы. В конце 1970х годов эти устройства впервые начали производить из компонентов с низким энергопотреблением, например жидкокристаллические экраны (LCD).

В результате успехов естественных наук стало возможным практическое использование процесса преобразования энергии солнечного излучения в электричество. Такую возможность предоставляют полупроводниковые материалы, в частности кремний. Кремний – третий по распространенности элемент во вселенной. Запасы кремния почти неисчерпаемы. Обычный песок это маленькие кусочки кремния. После довольно сложных процессов из кремния выращивают монокристаллы, которые затем нарезаются на пластины, травятся, формируются p-n переходы, наносится контактная маска толщиной 0.2-0.4 мм – получается так называемый “солнечный кремний”.

### Солнечные модули

Солнечная батарея – фотоэлектрический модуль – представляет собой набор тонких пластин монокристаллического кремния (хотя применяются поликристаллические

и аморфные). Элементы соединены плоскими проводами на стекле или прозрачном пластике, с обратной стороны пластины кремния заламинированны полиэфирной пленкой или специальным герметиком для защиты от окисления контактов и влаги. Количество пластин (элементов) зависит от принятой конструкции батареи и обычно подбирается так, чтобы ток и напряжение соответствовали условиям зарядки аккумуляторов. Элементы бывают размером 85x85 мм 100x100 мм, 125x125 мм или в форме окружности соответствующего диаметра. В зависимости от размера элементов изменяются размеры готовой батареи. КПД батареи обычно лежит в диапазоне 10.5 – 13.5%, хотя в лабораториях получены результаты до 18%, еще больший КПД имеют батареи на элементах из арсенида галлия, но они редки и дороги. Панель с элементами обычно обрамляется алюминиевым или пластиковым профилем для увеличения прочности и крепежа на месте установки. Для вывода энергии устанавливаются специальные разъемы.

Структура солнечного элемента показана на рисунке 1.

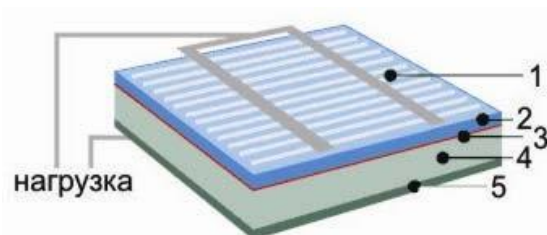
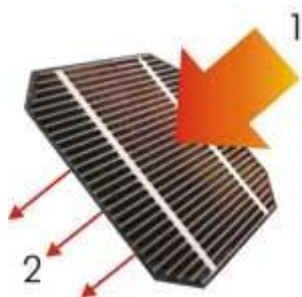


Рис. 1. Структура солнечного элемента: 1 - передний контакт; 2 – негативный слой; 3 – проводящий слой ; 4 – позитивный слой; 5 – задний контакт.

Все солнечные элементы прозрачны для инфракрасной области спектра, что приводит к меньшей нагреваемости элементов на солнце и соответственно увеличению их эффективности.



1 - солнечный свет  
2 - инфракрасные лучи

Солнечные элементы (СЭ), фотопреобразователи (ФП) – синонимы первичного преобразователя, осуществляющего прямое преобразование солнечной энергии в электрический ток.

Электрически соединенные солнечные элементы создают базовую основу для солнечных модулей (СМ), которые, в свою очередь, уже способны вырабатывать достаточную электрическую энергию для питания электропотребителей, а также служат базовыми элементами больших энергосистем. В зависимости от применений, солнечные модули могут иметь разные конструктивные решения и разные выходные мощности.

Существует несколько способов увеличения энергоэффективности: выбор оптимального угла установки, т.к. солнце в течение года постоянно меняет высоту над горизонтом желательно устанавливать солнечные батареи под тем углом, который обеспечивает максимальный выигрыш по производительности в нужное время. Другой путь увеличения производительности поворачивать солнечную батарею вслед за солнцем в течение дня. Таким образом, можно увеличить выработку энергии вплоть до 50% от выработки в стационарном положении. Энергия, полученная от солнечных батарей,

направляется на зарядку аккумуляторов, что необходимо по двум причинам: сглаживание неравномерности поступления энергии, например в облачную погоду, и удовлетворение потребности в энергии тогда, когда нет солнечного излучения (ночью).

Солнечные модули наземного использования обычно конструируются для зарядки свинцово-кислотных аккумуляторных батарей с номинальным напряжением 12 В.

При этом последовательно соединяются 36 солнечных элементов. Полученный пакет обычно обрамляют в алюминиевую раму, облегчающую крепление к несущей (опорной) конструкции. Мощность солнечных модулей может достигать 10...300 Вт.

Для получения необходимой мощности и рабочего напряжения модули соединяют последовательно или параллельно. Таким образом получают *фотоэлектрический генератор*. Мощность генератора всегда меньше, чем сумма мощностей модулей - из-за потерь, обусловленных различием в характеристиках однотипных модулей (потерь на рассогласование). Чем тщательнее подобраны модули в генераторе (или, чем меньше различие в характеристиках модулей), тем меньше потери на рассогласование. Например, при последовательном соединении десяти модулей с разбросом характеристик 10% потери составляют приблизительно 6%, а при разбросе 5% - уменьшаются до 2%.

При затенении одного модуля (или части элементов в модуле) в генераторе при последовательном соединении возникает "*эффект горячего пятна*" --затененный модуль (элемент) начинает рассеивать производимую освещенными модулями (элементами) мощность, быстро нагревается и выходит из строя. Для устранения этого эффекта параллельно с каждым модулем (или его частью) устанавливают шунтирующий диод. Диод необходим при последовательном соединении более двух модулей. К каждой линейке (последовательно соединенных модулей) тоже подключается блокирующий диод для выравнивания напряжений линеек. Все эти диоды обычно размещаются в соединительной коробке самого модуля.



Модули устанавливаются на стальных или алюминиевых опорных конструкциях на земле (или на крышах и фасадах зданий - и при этом служат одновременно кровельным или защитным материалом).

Вольтамперная кривая генератора имеет тот же вид, что и единичного модуля. Рабочая точка генератора, подключенного к нагрузке, не всегда совпадает с точкой максимальной мощности (тем более, что положение последней зависит от условий освещенности и температуры окружающей среды). Подключение таких нагрузок, как, например, электродвигатель, может сдвинуть рабочую точку системы в область минимальной или даже нулевой мощности (и двигатель просто не запустится). Поэтому, важный компонент солнечных электрических систем - преобразователи напряжения, способные согласовывать солнечный модуль с нагрузкой.

СЭ производит электричество когда освещается светом. В зависимости от интенсивности света (измеряемой в Вт/м<sup>2</sup>), солнечный элемент производит больше или меньше электричества: яркий солнечный свет более предпочтителен, чем тень, и тень более предпочтительна, чем электрический свет. Для сравнения СЭ и модулей необходимо знать так называемую номинальную мощность элемента или модуля. Номинальная мощность, выраженная в ваттах пиковой мощности  $W_p$ , это мера того, сколько электроэнергии может произвести фотоэлектрический модуль при оптимальных условиях.

Для определения и сравнения номинальной мощности солнечных панелей, выходная мощность измеряется при стандартных тестовых условиях (СТУ). Эти условия предполагают:

- освещенность 1000 Вт/м<sup>2</sup>
- солнечный спектр АМ 1.5 (он определяет тип и цвет света)
- температура элемента 25 °С (это важно, так как эффективность СЭ падает при повышении его температуры).

## Аккумуляторные батареи



Автономные фотоэлектрические системы (АФС) используются там, где нет сетей централизованного электроснабжения.

Для обеспечения энергией в темное время суток или в периоды без яркого солнечного света необходима аккумуляторная батарея.

Для фотоэлектрических систем больше подходят электрохимические

аккумуляторы, т.к. солнечный модуль производит, а потребитель потребляет электроэнергию, которая непосредственно и запасается в аккумуляторе. Большинство фотоэлектрических систем используют свинцово-кислотные аккумуляторы. Основными условиями по выбору аккумуляторов являются:

- стойкость к циклическому режиму работы;
- способность выдерживать глубокий разряд;
- низкий саморазряд;
- не критичность к нарушению условий зарядки и разрядки;
- долговечность;
- простота в обслуживании.

Важный параметр переносных (или периодически демонтируемых) солнечных систем - компактность и герметичность. Этим требованиям в полной мере удовлетворяют аккумуляторы, выполненные по технологиям "dryfit" и AGM (абсорбированный электролит) или рекомбинационной технологии. Они характеризуются отсутствием эксплуатационных затрат и перекрывают диапазон емкостей 1...12 000 Ач. Выделяющиеся при зарядке газы не выходят из аккумулятора, поэтому электролит не расходуется и обслуживание не требуется.

Для получения необходимого рабочего напряжения аккумуляторы или аккумуляторные батареи соединяют последовательно. При этом:

- применяют аккумуляторы только одного типа, выпущенные одним производителем;
- используют все аккумуляторы одновременно, не делая отводов от отдельных частей;
- не соединяют аккумуляторы в одну группу с разницей в дате выпуска более чем на месяц;
- обеспечивают разницу температур отдельных аккумуляторов не более 3°С.

Для продления срока службы аккумуляторов при циклическом режиме работы в солнечных системах важно не допускать и глубокого разряда. Степень разряда

характеризуется *глубиной разряда*, выражаемой в процентах от номинальной емкости аккумулятора.

Эксплуатация аккумуляторов при глубоком разряде приводит к необходимости их более частой замены и обслуживания - и, соответственно, к удорожанию системы. Глубину разряда аккумуляторов в солнечных системах стремятся ограничить на уровне 30...40%, что достигается отключением нагрузки (снижением мощности) или использованием аккумуляторов большей емкости. Поэтому, для управления процессом зарядки в состав солнечной электрической станции обязательно включают контроллеры зарядки разрядки аккумуляторной батареи.

Для подбора количества и типа аккумуляторов используют два параметра: конструкция инвертора (напряжение на низкой стороне) и ток зарядки, который может поступать от нескольких источников и не должен превышать 10 % от номинальной емкости для кислотных аккумуляторов и 25-30% от номинальной емкости для щелочных. Если в инверторе имеется зарядное устройство от сети, то оно должно автоматически регулировать зарядный ток в зависимости от степени заряда аккумуляторов. К необходимым свойствам аккумуляторов, применяемых в солнечных системах, необходимо отнести и низкий уровень саморазряда. Обычный кислотный аккумулятор требует подзарядки не реже чем один раз в 6 месяцев иначе выходит из строя, через год после начала эксплуатации уровень саморазряда обычного кислотного аккумулятора достигает 1,5% в день от его номинальной емкости. Поэтому к аккумуляторам, применяемым в солнечных системах, предъявляются специфические требования.

Для систем автономного электроснабжения **НЕЛЬЗЯ** использовать "автомобильные" аккумуляторы или аккумуляторы, не имеющие глубокого цикла !!!

Для работы в автономных системах используются специальные аккумуляторные батареи со сроком службы до 10 и более лет.

**Свинцово-кислотные аккумуляторы с заливкой:** Жидкостные свинцово-кислотные или свинцово-кислотные аккумуляторы с заливкой чаще всего применяются для сохранения электрической энергии. Существуют аккумуляторы вентилируемого типа (наиболее распространенные), в которые можно добавлять воду, а также герметичного типа, в которые воду добавлять нельзя.

В **Аккумуляторах с абсорбирующим стеклянным матом** (аккумуляторы AGM) применяется фиброгласовый мат, насыщенный серной кислотой. AGM аккумуляторы иногда называют также "недокормленными" или "сухими" аккумуляторами, потому что фиброгласовый мат насыщен серной кислотой только на 95%, и в нем отсутствует избыточная жидкость. Аккумулятор AGM "чище", при его перевозке не нужно выполнять требования, предъявляемые к опасным материалам. Они прекрасно подходят для большинства вариантов применения, способны работать в довольно тяжелых условиях и не дают утечку даже в случае повреждения. Их основным недостатком по сравнению с заливаемыми аккумуляторами является высокая стоимость – они обходятся в 2-3 раза дороже. В случае, когда пары и утечки не являются поводом для беспокойства, более экономичным выбором является, пожалуй, свинцово-кислотный аккумулятор с заливкой промышленного типа.

**Гелевые элементы** или герметичные свинцово-кислотные аккумуляторы часто выбирают в ситуациях, когда невозможно обеспечить вентиляцию аккумуляторов или их установку в требуемом положении. Гелевые элементы являются более "чистыми" – в том смысле, что из них не выделяется газ – как из свинцово-кислотных аккумуляторов. Однако гелевые элементы более чувствительны к зарядному напряжению, поскольку их невозможно вентилировать – за исключением экстренных ситуаций (которые могут вызвать непоправимые повреждения). Кроме того, гелевые ячейки гораздо более чувствительны к воздействию высоких температур и не могут в течение длительного времени – по сравнению со свинцово-кислотными аккумуляторами - находиться в

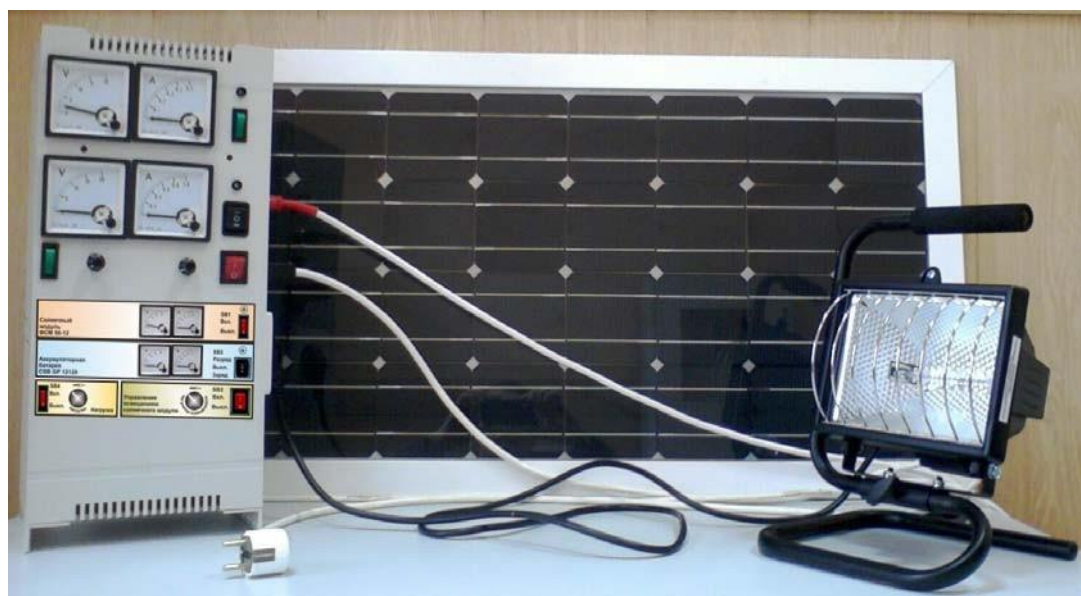
разряженном состоянии. Поэтому необходимо надлежащим образом регулировать зарядку гелевых элементов. Для аккумуляторов на гелевых элементах может потребоваться дополнительный регулятор с температурной компенсацией. За конкретными рекомендациями следует обратиться к изготовителю.

**Никель-кадмиевые или железно-никелевые аккумуляторы** обычно применяют в экстремальных условиях. Эти аккумуляторы действуют при температурах ниже  $-40^{\circ}\text{C}$ . Они могут обеспечивать больший ток и более глубокие и частые циклы по сравнению со свинцово-кислотными, AGM и гелевыми аккумуляторами. Срок службы железно-никелевых аккумуляторов может превышать 20 лет. Железно-никелевые аккумуляторы относятся к наиболее экологичным аккумуляторам. Однако в никель-кадмиевых аккумуляторах содержатся тяжелые металлы. К недостаткам аккумуляторов этого типа можно отнести их высокую стоимость и низкий КПД зарядки.

Для контроля за состоянием аккумуляторной батареи часто применяют **регуляторы зарядки-разрядки**. Чтобы защитить батарею от избыточной разрядки, нагрузка должна быть отключена, когда напряжение батареи падает ниже *напряжения отключения*. Нагрузка не должна подключаться до момента, когда напряжение не возрастет до определенного порога (*напряжения подключения*). Эти значения зависят от конструкции определенных батарей, производственного процесса и срока службы батарей. Чтобы защитить батарею от перезарядки необходимо ограничить зарядный ток по достижении *напряжения окончания зарядки*. Напряжение начнет снижаться, пока не достигнет другого порога, называемого *напряжением возобновления заряда*.

В регуляторах предусматривают следующие виды защиты: от короткого замыкания в нагрузке; от подключения аккумуляторной батареи обратной полярностью; температурная компенсация значений пороговых напряжений (это бывает необходимо, если предполагается эксплуатация батарей при температурах ниже  $10^{\circ}\text{C}$ ).

## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ



Лабораторная установка «Исследование автономной системы электроснабжения на базе солнечного модуля ФСМ 50-12» включает следующие основные элементы.

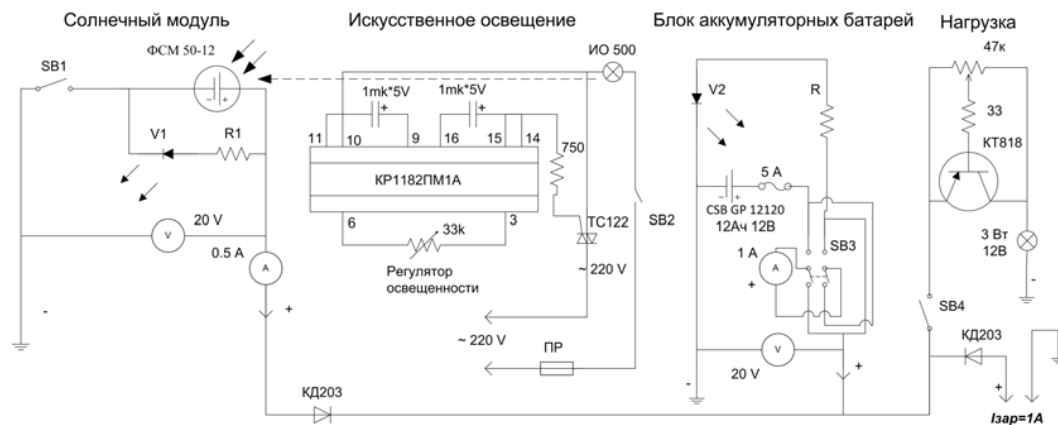
Название	Описание	Фото
Солнечный модуль <b>ФСМ 50-12</b>	Солнечный модуль для стационарного использования на основании солнечных элементов из кристаллического кремния. Габаритные размеры: 1000 x 500 x 15 мм. Ток заряда: 4 А. Напряжение: 12 В.	
Нагрузка	Аналог активной нагрузки на базе транзистора с возможностью плавного регулирования.	
Освещение	Пржектор ИО 500 с блоком фазового регулирования мощности	
Блок управления		



Лабораторная установка «Исследование автономной системы электроснабжения на базе солнечного модуля ФСМ 50-12» позволяет обеспечить плавное регулирование искусственного освещения, плавное регулирование сопротивления нагрузки, измерение освещенности, измерение тока и напряжения солнечного модуля, аккумуляторной батареи, формирование различных схем включения элементов с помощью переключателей.

Напряжение с солнечного модуля ФСМ 50-12 поступает на аккумуляторную батарею и на нагрузку. При отсутствии нагрузки (небольшой нагрузке) аккумуляторная батарея может заряжаться от СМ. Зарядное устройство используется для зарядки аккумуляторной батареи при плохих погодных условиях. Для имитации освещения солнечных модулей используется прожектор с регулятором освещения.

Принципиальная электрическая схема приведена на рис.



## ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

1. Подключите солнечный модуль к нагрузке.
2. Включите прожектор. Задайте освещенность солнечного модуля 100% изменяя сопротивление регулятора освещенности.
3. Изменяя сопротивление нагрузки равномерно в диапазоне от холостого хода до максимального значения измерьте значения тока и напряжения в цепи для 7 точек и запишите значения в таблицу.
4. Измените уровень освещенности солнечного модуля. Повторите пункты №3,4 для двух различных значений освещенности <100%. Значения тока и напряжения запишите в таблицу.
5. Верните регулятор освещенности в исходное состояние, верните переключатели в исходное состояние.

Освещенность, %	Ступени нагрузки	U, В	I, А	P, Вт	R, Ом
Максимальная(100%)	ступень 1				
	ступень 2				
	ступень 3				
	ступень 4				
	ступень 5				
	ступень 6				
	ступень 7				

Средняя (50%)	ступень 1				
	ступень 2				
	ступень 3				
	ступень 4				
	ступень 5				
	ступень 6				
	ступень 7				
Минимальная (20%)	ступень 1				
	ступень 2				
	ступень 3				
	ступень 4				
	ступень 5				
	ступень 6				
	ступень 7				

6. Рассчитайте значения  $P$ ,  $R$ .
7. Постройте характеристики  $P, U=f(I)$  для различных значений освещенности солнечного модуля. Определите точки короткого замыкания солнечного модуля. Постройте характеристики  $P, U, I=f(\text{освещенность})$  (для точек  $P_{\max}$ ).
8. Проанализируйте полученные данные.

### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Принципиальная схема.
3. Таблицы с данными.
4. Графики.
5. Выводы по работе. На основании полученных данных проанализировать работу автономной системы электроснабжения.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА

1. Перечислите основные элементы лабораторной установки и назначение каждого элемента.
2. Рассказать порядок проведения опытов.
3. При каких уровнях освещенности необходимо получить вольтамперные характеристики?
4. Какие показания измерительных приборов необходимо зафиксировать?
5. Что такое режим холостого хода?
6. Что такое режим короткого замыкания?

### ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ

- 1) Как устроен кремниевый фотоэлемент?
- 2) Поясните принцип действия фотоэлемента
- 3) Назовите электрические характеристики фотоэлемента.
- 4) Перечислите технические требования к фотоэлементам.

- 5) Плотность потока излучения, падающего на землю, составляет  $E = 200 \text{ Вт/м}^2$ . Какую площадь должна иметь солнечная батарея с КПД  $\eta = 20\%$  и мощностью  $N = 400 \text{ Вт}$ ?
- 6) Солнечная батарея состоит из 20 фотоэлементов размером  $10 \times 5 \text{ см}$ . Плотность потока излучения, падающего на землю, составляет  $E = 100 \text{ Вт/м}^2$ . Какую мощность вырабатывает батарея, если ее КПД  $\eta = 20\%$ ?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Олешкевич М.М. Нетрадиционные источники энергии: учебно-методическое пособие – Минск: БНТУ, 2016. - 205с. <https://reader.lanbook.com/book/248141#1>
2. Мартюшев, Д. А. Возобновляемые источники энергии : учебное пособие / Д. А. Мартюшев, П. Ю. Илюшин. — Пермь : ПНИПУ, 2015. — 136 с. — ISBN 978-5-398-01455-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/160508> (дата обращения: 10.04.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. <http://www.mysolar.com/>
4. <http://www.solarhome.ru/>