

Министерство образования и науки Российской Федерации
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ НЕФТИ И ГАЗА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
имени И. М. ГУБКИНА

Кафедра термодинамики и тепловых двигателей

В. В. БЕССЕЛЬ
В. Г. КУЧЕРОВ
Р. Д. МИНГАЛЕЕВА

ИЗУЧЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Учебно-методическое пособие

Москва 2016

Рецензент:

зав. кафедрой теоретической
электротехники и электрификации
нефтяной и газовой промышленности,
доктор технических наук, профессор *А. В. Егоров*
Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет)
имени И. М. Губкина

Бессель В. В., Кучеров В. Г., Мингалеева Р. Д.

Изучение солнечных фотоэлектрических элементов:
Учебно-методическое пособие. – М.: Издательский центр
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, 2016. – 90 с.

Рассматриваются физико-технические основы фотоэлектрической солнечной энергетики. Для лучшего понимания представленного материала в пособии приводятся методические указания к лабораторным работам по изучению солнечных фотоэлектрических элементов.

Пособие рекомендуется использовать при изучении магистрантами университета курсов «Энергоэффективность и альтернативная энергетика» и «Альтернативная энергетика в ТЭК», а также может быть рекомендовано слушателям системы дополнительного профессионального образования.

© В. В. Бессель, В. Г. Кучеров,
Р. Д. Мингалеева, 2016
© РГУ нефти и газа (НИУ)
имени И. М. Губкина, 2016

Содержание

Введение	4
1. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ.....	6
1.1. Солнечное излучение.....	6
1.2. Фотоэлектрический эффект.....	12
1.3. Типы солнечных элементов.....	21
1.4. Солнечные панели	23
1.5. Электрические характеристики солнечной панели	25
1.6. Номинальная мощность солнечной панели	26
1.7. Сравнение аморфных и кристаллических солнечных панелей.....	32
1.8. Срок службы солнечных панелей.....	36
1.9. Фотоэлектрические системы	38
1.10. Поддерживающая конструкция	41
1.11. Контроллеры заряда-разряда	42
1.12. Инверторы для фотоэлектрических систем	48
1.13. Ориентация солнечных панелей.....	50
1.14. Выбор солнечных панелей для системы солнечного электроснабжения	54
2. ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД «SOLAR LAB». ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	57
3. ТРЕБОВАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ.....	59
4. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ С ЛАБОРАТОРНЫМ СТЕНДОМ «SOLAR LAB»	61
4.1. Стенд «Внешний»	61
4.2. Стенд «Внутренний».....	66
5. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	71
5.1. <i>Лабораторная работа №1. Напряжение холостого хода солнечных элементов.....</i>	<i>71</i>
5.2. <i>Лабораторная работа №2. Ток короткого замыкания солнечных элементов</i>	<i>77</i>
5.3. <i>Лабораторная работа №3. Вольт-амперная характеристика солнечных элементов</i>	<i>83</i>
Литература.....	90

Введение

В последние десятилетия мировая солнечная энергетика развивается высокими темпами, солнечные электростанции становятся частью энергетической инфраструктуры многих стран. Развитие солнечных технологий оказывает существенное влияние на экономику. Можно ожидать, что в ближайшие десятилетия солнечная энергетика станет стимулом для экономического развития стран и регионов, обладающих максимальным «солнечным» ресурсом.

До Земли доходит только часть энергии, вырабатываемой Солнцем – гигантским «энергетическим котлом». Оценки показывают, что технический потенциал энергии Солнца (рассчитанный с помощью существующих технико-технологических средств), попадающей на нашу планету ежегодно, на много порядков превышает доказанные извлекаемые запасы всего органического топлива (уголь, торф, нефть, природный газ), сосредоточенного в земной коре. Если энергию, поставляемую на нашу планету Солнцем за год, перевести в условное топливо, то эта цифра составит около 100 триллионов тонн. Это в десять тысяч раз больше необходимого нам количества.

Совершенствование технологий солнечной энергетике привело к тому, что себестоимость производства 1 кВт·ч энергии на солнечных электростанциях либо сопоставима, либо ниже себестоимости производства энергии из «нетрадиционных» источников углеводородного сырья. Кроме того, следует учесть и антропогенное воздействие сжигаемого с целью получения энергии органического топлива, которое уже привело к изменениям биосферы нашей планеты.

Один из технологических вызовов, стоящих перед нефтегазовой промышленностью, связан с эффективным и рациональным

использованием энергии, в том числе альтернативной и возобновляемой, на объектах добычи, подготовки, транспорта и переработки углеводородного сырья с главной целью – экономии товарных углеводородов.

На кафедре термодинамики и тепловых двигателей РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина создан научный коллектив для изучения этих проблем, который совместно с учеными ведущего европейского университета – Королевского технологического института Стокгольма (Швеция) – проводит работу по изучению различных видов альтернативной энергии. В рамках этой работы уже созданы лабораторные стенды для изучения физических основ энергии Солнца и ветра, к изучению которых приступаете и вы, дорогие друзья.

Лабораторный стенд «Solar Lab» предназначен для проведения лабораторных работ по изучению солнечных фотоэлектрических элементов (получения вольт-амперных характеристик солнечных элементов, расчета их КПД, оптимальных рабочих параметров, определения наиболее выгодной ориентации для заданного региона и т.д.).

Программное обеспечение лабораторного стенда обладает простым и доступным интерфейсом пользователя и разработано на основе графического языка программирования LabView. Контрольно-измерительное оборудование стенда основано на программируемой платформе NI PXI Express, предназначенной для сбора данных.

Авторы выражают благодарность выпускникам 2015 года кафедры термодинамики и тепловых двигателей РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина за участие в запуске и тестировании лабораторного стенда «Solar Lab».

1. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

1.1. Солнечное излучение

Количество энергии, попадающей на земную поверхность от Солнца, огромно. Так, например, мощность потока солнечной радиации, поступающей на площадь 10 км^2 , в безоблачный день достигает 7–9 миллионов кВт. Эта величина превышает мощность Красноярской ГЭС [1].

Солнечные энергетические технологии превращают электромагнитное излучение Солнца в формы тепла и электроэнергии. Существуют три основных технологии использования солнечной энергии:

- Солнечные коллекторы для нагрева жидкого или газообразного теплоносителя.
- Технология концентрированной солнечной энергии, в которой солнечное тепло используется для получения пара, с помощью которого турбины вырабатывают электроэнергию (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Установка концентрированной солнечной энергии

- Фотоэлектрические технологии, позволяющие напрямую преобразовывать солнечное излучение в электричество.

Сегодня солнечное электричество широко используется в удаленных районах, где нет централизованного электроснабжения, или для электроснабжения домов, офисов и других зданий в местах, где есть централизованная сеть электроснабжения. В последние годы именно это применение обеспечивает около 90% рынка солнечных панелей. В подавляющем большинстве случаев солнечные панели работают параллельно с сетью и генерируют экологически чистое электричество для сетей централизованного электроснабжения. Во многих странах существуют специальные механизмы поддержки солнечной энергетики, например, специальные повышенные тарифы для поставки электроэнергии от солнечных панелей в сеть, налоговые льготы, льготы при получении кредитов на покупку оборудования и т.п. На этапе становления фотоэнергетики такие механизмы действовали в Европе, США, Японии, Китае, Индии и других странах. К сожалению, Россия в этом отношении отстала, и реально действующих механизмов поддержки возобновляемой энергетики нет. В настоящее время солнечная энергетика обеспечивает немногим более 1% генерации электричества в мире. Однако, в ряде европейских стран эта доля существенно выше. Так, например, в Германии эта цифра составляет около 6% [2].

Интенсивность солнечного света, которая достигает Земли, меняется в зависимости от времени суток, года, местоположения и погодных условий. Общее количество энергии, подсчитанное за день или за год, называется иррадиацией (или «приход солнечной радиации») и показывает, насколько мощным было солнечное излучение. Иррадиация измеряется в $[Вт \cdot ч / м^2]$ в день или за другой период.

Интенсивность солнечного излучения в свободном пространстве на удалении, равном среднему расстоянию между Землей и Солнцем, называется солнечной постоянной. Ее величина 1353 Вт/м^2 [3]. При прохождении через атмосферу солнечный свет ослабляется, в основном, из-за поглощения инфракрасного излучения парами воды, ультрафиолетового – озоном, и рассеяния излучения частицами атмосферной пыли и аэрозолями. Показатель атмосферного влияния на интенсивность солнечного излучения, доходящего до земной поверхности, называется «воздушной массой» (AM).

На рисунке 1.2 показано спектральное распределение интенсивности солнечного излучения в различных условиях. Верхняя кривая (AM0) соответствует солнечному спектру за пределами земной атмосферы (например, на борту космического корабля), то есть при нулевой воздушной массе. Она аппроксимируется распределением интенсивности излучения абсолютно черного тела при температуре 5800 К. Кривые AM1 и AM2 иллюстрируют спектральное распределение солнечного излучения на поверхности Земли, когда Солнце в зените, и при угле между Солнцем и

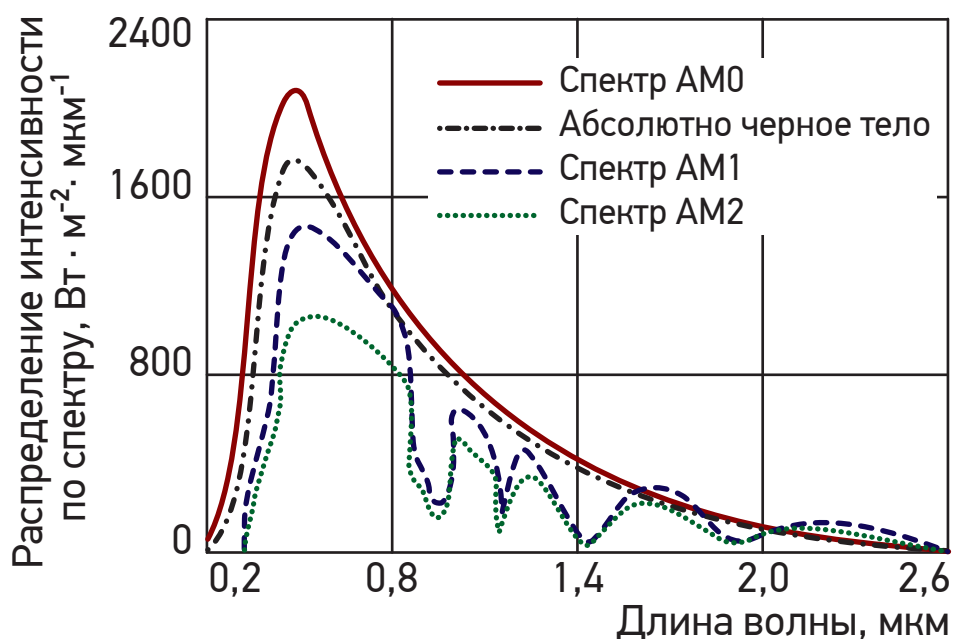


Рис. 1.2. Спектральное распределение интенсивности солнечного излучения в различных условиях

зенитом 60° , соответственно. При этом полная мощность излучения составляет порядка 925 и 691 Вт/м². Средняя интенсивность излучения на Земле примерно совпадает с интенсивностью излучения при AM1.5 (Солнце находится под углом 45° к горизонту) [3].

Около поверхности Земли можно принять среднюю величину интенсивности солнечной радиации 635 Вт/м², в очень ясный солнечный день эта величина колеблется от 950 Вт/м² до 1220 Вт/м², а среднее значение составляет примерно 1000 Вт/м² [3].

Пример 1.1. Интенсивность полного излучения в Цюрихе ($47^\circ 30'$ с. ш., 400 м над уровнем моря) на поверхности, перпендикулярной излучению: 1 мая 12 ч. 00 мин. – 1080 Вт/м²; 21 декабря 12 ч. 00 мин. – 930 Вт/м² [4].

Для упрощения вычисления по приходу солнечной энергии его обычно выражают в часах солнечного сияния с интенсивностью 1000 Вт/м². То есть 1 час соответствует приходу солнечной радиации в 1000 Вт·ч/м². Это примерно соответствует периоду, когда солнце светит летом в середине солнечного безоблачного дня на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам.

Иррадиация меняется в течение дня и от места к месту, особенно в горных районах. Она меняется в среднем от 1000 кВт·ч/м² в год для северо-европейских стран до 2000-2500 кВт·ч/м² в год для пустынь. Погодные условия и склонение солнца (которое зависит от широты местности) также приводят к различиям в приходе солнечной радиации.

Пример 1.2. Яркое солнце светит с интенсивностью 1000 Вт/м² на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам. За 1 час на 1 м² падает 1 кВт·ч энергии. Аналогично, средний приход солнечной радиации в 5 кВт·ч/м² в течение дня соответ-

ствуется 5 пиковым часам солнечного сияния в день. Не путайте пиковые часы с реальной длительностью светового дня. За световой день солнце светит с разной интенсивностью, но в сумме дает такое же количество энергии, как если бы оно светило 5 часов с максимальной интенсивностью. Именно пиковые часы солнечного сияния используются в расчетах солнечных энергетических установок.

В России, вопреки распространенному мнению, очень много мест, где выгодно преобразовывать солнечную энергию в электроэнергию при помощи солнечных батарей. На рисунке 1.3 приведена карта ресурсов солнечной энергии в России [4,5].

На большей части России можно успешно использовать солнечные панели в сезонном режиме, а в районах с числом часов солнечного сияния более 2000 ч/год – круглый год. Естественно, в зимний период выработка энергии солнечными панелями существенно снижается, но все равно стоимость электроэнергии от солнечной электростанции остается намного ниже, чем от дизельного или бензинового генератора.

Потенциал солнечной энергии наиболее велик на юго-западе (Северный Кавказ, район Черного и Каспийского морей, Крым) и на Дальнем Востоке. Значительными ресурсами обладают Калмыкия, Ставропольский край, Ростовская область, Краснодарский край, Волгоградская область, Астраханская область и другие регионы на юго-западе, а также Алтай, Приморье, Читинская область, Бурятия и другие регионы на юго-востоке. В некоторых районах Западной и Восточной Сибири и Дальнего Востока годовая солнечная иррадиация составляет $1300 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, превосходя значения южных регионов России. Например, в Иркутске (52° с.ш.) количество солнечной энергии достигает $1340 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в год, а в Республике Якутия-Саха (62° с.ш.) – $1290 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ [5].

Продолжительность солнечного сияния:

- менее 1700 часов в год
- от 1700 до 2000 часов в год
- более 2000 часов в год

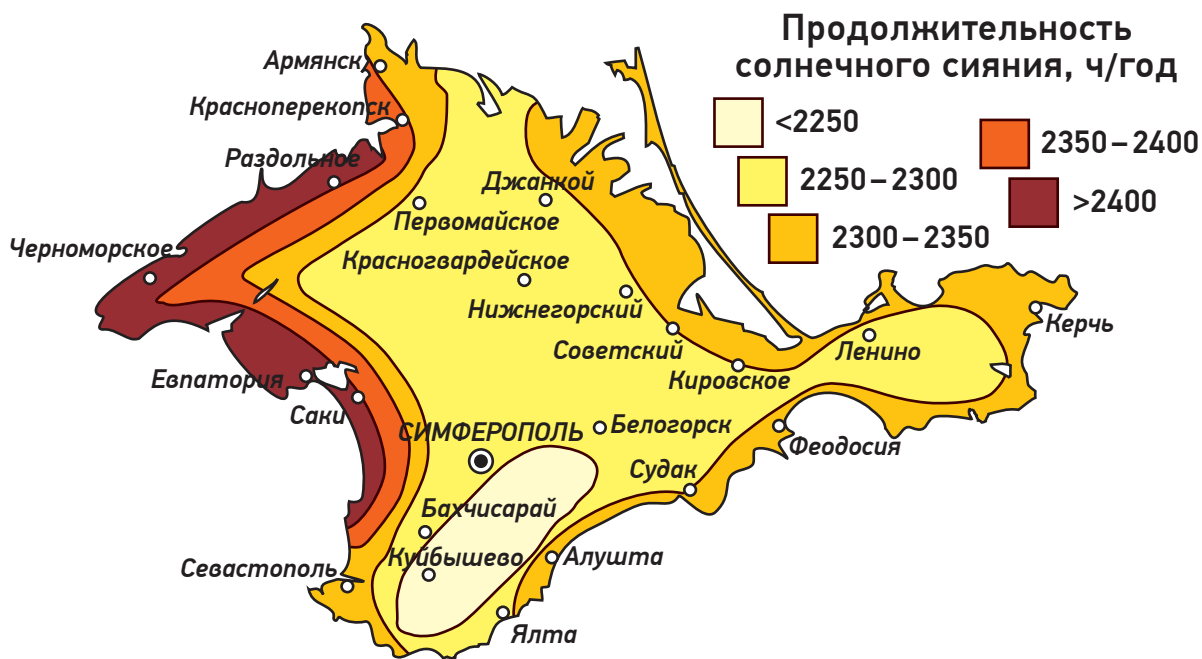


Рис. 1.3. Карта ресурсов солнечной энергии в России

Особенно выгодно применение солнечных батарей там, где нет централизованных электрических сетей, и энергообеспечение происходит за счет дизель-генераторов. А таких районов в России очень много. Более того, даже там, где сети есть, использование работающих параллельно с сетью солнечных панелей позволяет значительно снизить расходы на электроэнергию.

1.2. Фотоэлектрический эффект

Фотоэлектрический эффект (фотоэффект) был открыт французским ученым А.Э. Беккерелем в 1839 году и основан на способности токопроводящих материалов испускать электроны под действием электромагнитного излучения, в том числе и света. Три основных закона фотоэффекта можно сформулировать следующим образом [3]:

1) Сила фототока прямо пропорциональна плотности электромагнитного излучения.

2) Максимальная кинетическая энергия вырываемых светом электронов линейно возрастает с частотой электромагнитного излучения и не зависит от его интенсивности.

3) Для каждого вещества при определенном состоянии его поверхности существует граничная частота электромагнитного излучения, ниже которой фотоэффект не наблюдается. Эта частота и соответствующая длина волны называются красной границей фотоэффекта.

Фотоэффект проявляется в фотоэлектрической системе, напрямую преобразующей солнечную энергию в электричество. Для работы фотоэлектрической системы необходим дневной свет. Фотоэлектрические системы не должны обязательно находиться под прямыми солнечными лучами, так что даже в пасмурные дни фотоэлектрические панели могут вырабатывать некоторое количество электроэнергии.

Простейшая конструкция фотоэлектрического или солнечного элемента (СЭ) – прибора для преобразования энергии солнечного излучения – на основе монокристаллического кремния показана на рис. 1.4.

На малой глубине от поверхности кремниевой пластины *p*-типа сформирован *p–n*-переход с тонким металлическим контактом;

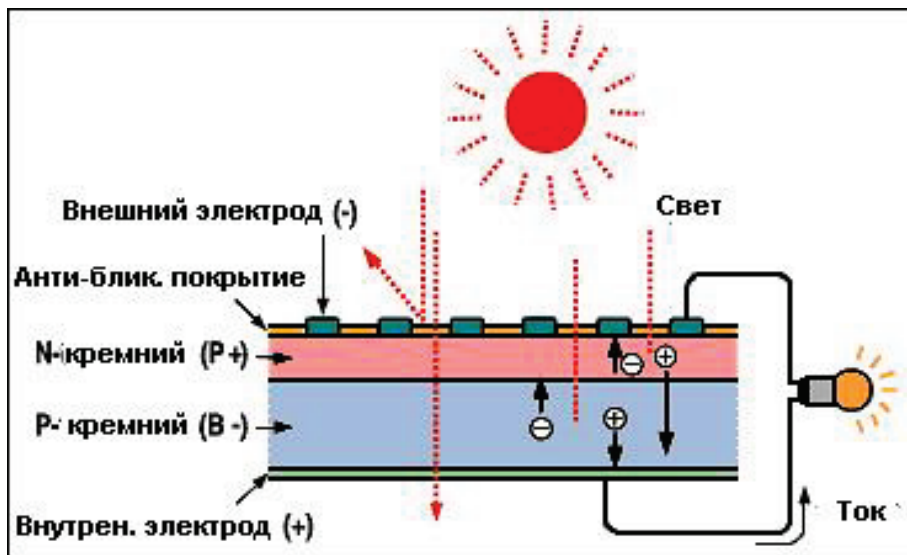


Рис. 1.4. Конструкция фотоэлектрического элемента

на тыльную сторону пластины нанесен сплошной металлический контакт.

Пусть p - n -переход расположен вблизи от освещаемой поверхности полупроводника. При использовании солнечного элемента в качестве источника электроэнергии к его выводам должно быть подсоединено сопротивление нагрузки R_H . Рассмотрим сначала два крайних случая: $R_H=0$ (режим короткого замыкания) и $R_H = \infty$ (режим холостого хода). Зонные диаграммы для этих режимов изображены на рис. 1.5а, б [3].

В первом случае зонная диаграмма освещенного p - n -перехода не отличается от зонной диаграммы при термодинамическом равновесии (без освещения и без приложенного напряжения смещения), поскольку внешнее закорачивание обеспечивает нулевую разность потенциалов между n - и p -областями. Однако через p - n -переход и внешний проводник течет ток, вызванный фотогенерацией электронно-дырочных пар в p -области. Фотоэлектроны, образовавшиеся в непосредственной близости от области объемного заряда, увлекаются электрическим полем p - n -перехода и попадают в n -область.

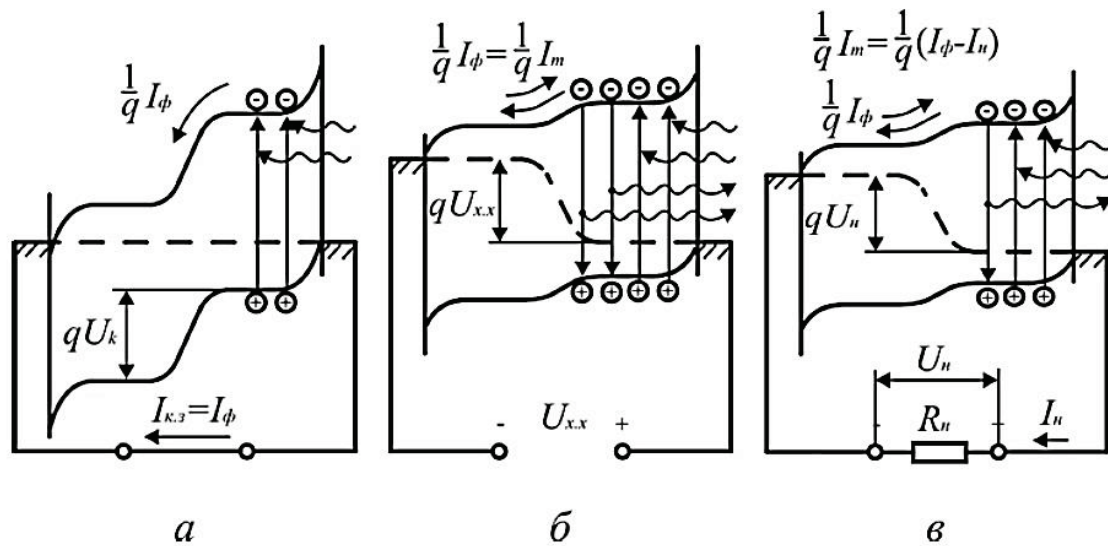


Рис. 1.5. Зонные энергетические диаграммы $p-n$ -перехода при освещении в разных режимах:
а – короткого замыкания; *б* – холостого хода; *в* – включения на сопротивление нагрузки

Остальные электроны диффундируют к $p-n$ -переходу, стараясь восполнить их убыль, и в итоге также попадают в n -область. В n -области возникает направленное движение электронов к тыльному металлическому контакту, перетекание во внешнюю цепь и в контакт с p -областью. На границе контакта с p -областью происходит рекомбинация подошедших сюда электронов с фотогенерированными дырками.

При разомкнутой внешней цепи $p-n$ -перехода (рис. 1.5б) фотоэлектроны, попадая в n -область, накапливаются в ней и заряжают её отрицательно. Оставшиеся в p -области избыточные дырки заряжают p -область положительно. Возникающая таким образом разность потенциалов является напряжением холостого хода (U_{xx}), полярность которого соответствует прямому смещению $p-n$ -перехода.

Поток генерированных светом носителей образует фототок (I_ϕ). Величина его равна числу фотогенерированных носителей, прошедших через $p-n$ -переход в единицу времени. При нулевых

внутренних омических потерях в солнечном элементе режим короткого замыкания (рис. 1.5а) эквивалентен нулевому напряжению смещения p – n -перехода, поэтому ток короткого замыкания ($I_{кз}$) равен фототоку (I_{ϕ}). В режиме холостого хода (рис. 1.5б) фототок уравнивается «темновым» током (I_T) – прямым током через p – n -переход, возникающим при напряжении смещения (U_{xx}). «Темновой» ток сопровождается рекомбинацией неосновных носителей тока (в данном случае электронов в p -области). При рекомбинациях потенциальная энергия электронно-дырочных пар выделяется либо излучением фотонов с $h\nu \approx E_g$, либо расходуется на нагревание кристаллической решетки (рис. 1.5б). Таким образом, режим холостого хода солнечного элемента эквивалентен режиму работы светодиодов, а также выпрямительных диодов в пропускном направлении.

Если к p – n -переходу подключить варьируемое сопротивление нагрузки (рис. 1.5в), то направление тока в ней всегда совпадает с направлением фототока (I_{ϕ}), а сам ток нагрузки (I_H) равен результирующему току через p – n -переход. Нагрузочную вольт-амперную характеристику (ВАХ) освещенного p – n -перехода (рис. 1.6) можно записать как [3]:

$$U_H = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{I_{\phi} - I_H}{I_0} + 1 \right), \quad (1.1)$$

где U_H – напряжение на нагрузке, равное напряжению на p – n -переходе, В; I_H – ток нагрузки, А; I_0 – ток насыщения, А; I_{ϕ} – фототок, А; k – постоянная Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T – абсолютная температура, К; q – величина заряда электрона.

Максимальная мощность отбирается в том случае, когда солнечный элемент находится в режиме, отмеченном точкой a на рис. 1.6

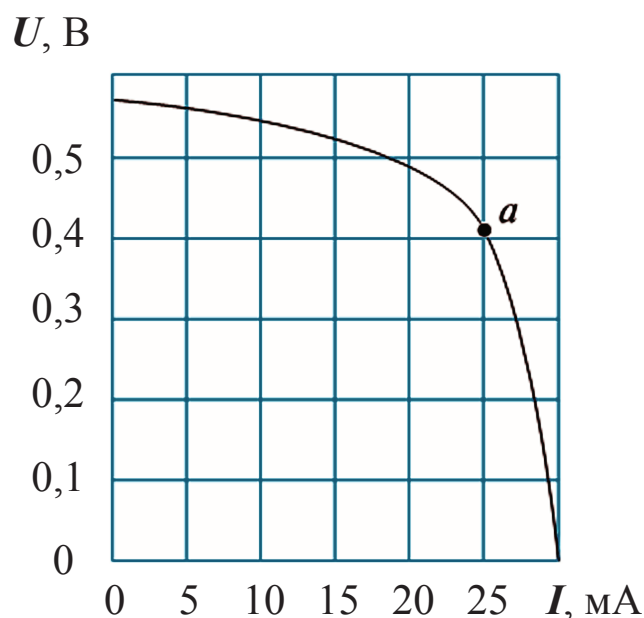


Рис. 1.6. Вольт-амперная характеристика солнечного элемента

Максимальная мощность, снимаемая с единицы площади солнечного элемента, вычисляется по формуле [3]:

$$P_{\max} = U_{\text{ТММ}} \cdot I_{\text{ТММ}} = FF \cdot I_{\text{кз}} \cdot U_{\text{хх}}, \quad (1.2)$$

где $U_{\text{ТММ}}$ – напряжение в точке максимальной мощности (точка a , рис. 1.6), В; $I_{\text{ТММ}}$ – ток в точке максимальной мощности (точка a , рис. 1.6), А; FF – коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики; $I_{\text{кз}}$ – ток короткого замыкания, А; $U_{\text{хх}}$ – напряжение холостого хода, В.

Характеристики солнечного элемента

- Напряжение холостого хода – это максимальное напряжение, создаваемое солнечным элементом, возникающее при нулевом токе (рис. 1.7). Оно равно прямому смещению, соответствующему изменению напряжения p – n -перехода при появлении светового тока. Напряжение холостого хода обычно обозначается $U_{\text{хх}}$ или $V_{\text{ос}}$. Напряжение холостого хода монокристаллических солнечных элементов высокого качества достигает 730 мВ при

условии AM1.5. В коммерческих устройствах оно обычно находится на уровне 600 мВ. Напряжение холостого хода солнечного элемента мало меняется при изменении освещенности.



Рис. 1.7. Вольт-амперная характеристика солнечного элемента и напряжение холостого хода

- Ток короткого замыкания – это ток, протекающий через солнечный элемент, когда напряжение равно нулю (то есть когда солнечный элемент замкнут накоротко) (рис. 1.8). Ток короткого замыкания обычно обозначается $I_{кз}$ или I_{sc} . Он возникает в результате генерации и разделения сгенерированных светом носителей. В идеальном солнечном элементе при условии умеренных резистивных потерь он равен световому току. Поэтому ток короткого замыкания можно считать максимальным током, который способен создать солнечный элемент. Кроме того, он прямо пропорционально зависит от интенсивности света.

- На практике солнечный элемент работает при комбинации тока и напряжения, когда вырабатывается достаточная мощность. Лучшее их сочетание называется точкой максимальной мощности (ТММ), соответствующие напряжение и ток обозначаются $U_{ТММ}$ и $I_{ТММ}$.

- Коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики (ВАХ) солнечного элемента (fill factor, FF). Ток короткого замы-

кания и напряжение холостого хода – это максимальные ток и напряжение, которые можно получить от солнечного элемента. Однако, при напряжении холостого хода и токе короткого замыкания мощность солнечного элемента равна 0.

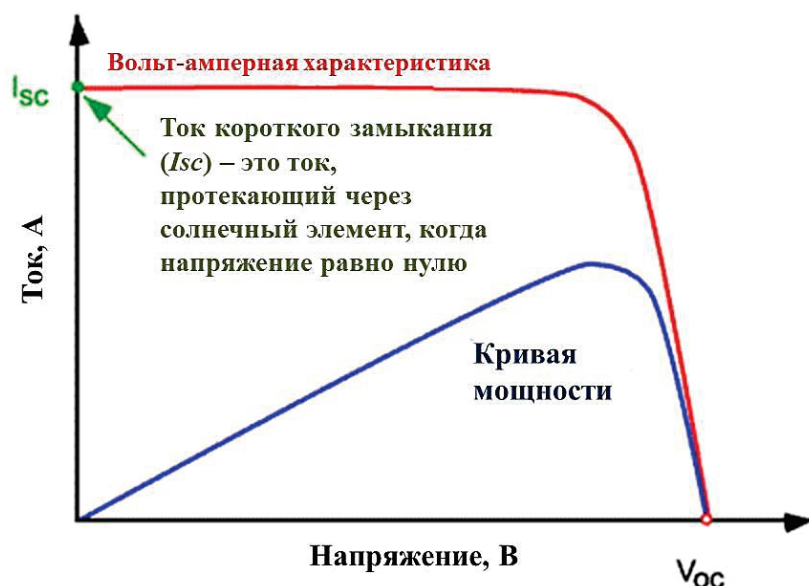


Рис. 1.8. Вольт-амперная характеристика солнечного элемента и ток короткого замыкания

Коэффициент заполнения – параметр, который в сочетании с напряжением холостого хода и током короткого замыкания определяет максимальную мощность солнечного элемента. Он вычисляется, как отношение максимальной мощности солнечного элемента к произведению напряжения холостого хода и тока короткого замыкания:

$$FF = \frac{(U_{ТММ} \cdot I_{ТММ})}{(I_{кз} \cdot U_{хх})}, \quad (1.3)$$

где $U_{ТММ}$ – напряжение в точке максимальной мощности (ТММ), В; $I_{ТММ}$ – ток в ТММ, А; $U_{хх}$ – напряжение холостого хода, В; $I_{кз}$ – ток короткого замыкания, А.

Графически коэффициент заполнения представляет собой меру квадратичности солнечного элемента и равен максимальной

площади прямоугольника, который можно вписать в вольт-амперную кривую (рис. 1.9).

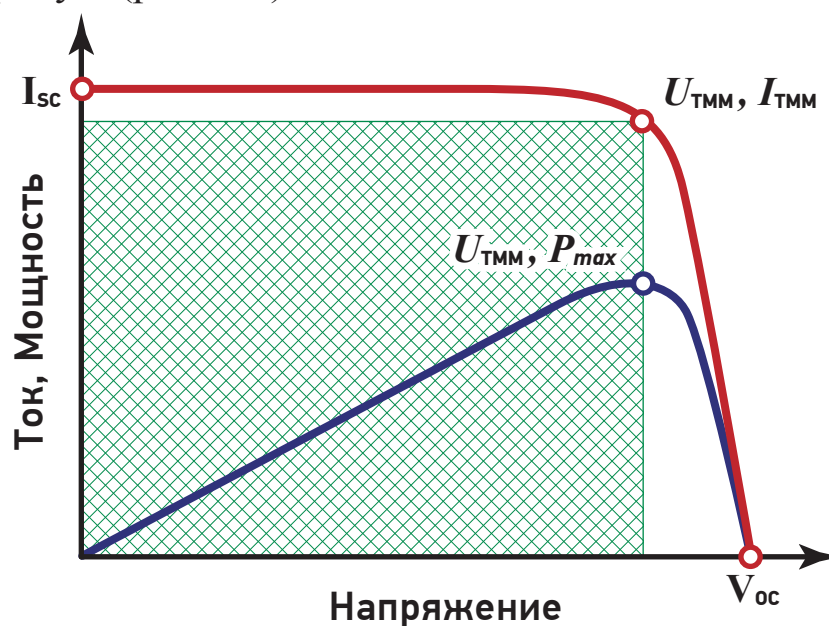


Рис. 1.9. Графическое представление коэффициента заполнения вольт-амперной характеристики (ВАХ) солнечного элемента

Так как коэффициент заполнения является мерой квадратичности вольт-амперной кривой, солнечный элемент с более высоким напряжением будет иметь и более высокий возможный коэффициент заполнения, поскольку закругленная часть кривой занимает меньше места.

Коэффициент заполнения ВАХ является одним из основных параметров, по которому можно судить о качестве фотоэлектрического преобразователя. Типичные качественные серийно выпускаемые солнечные элементы имеют коэффициент заполнения ВАХ более 0,7. Бракованные элементы имеют коэффициент заполнения ВАХ от 0,4 до 0,65. У аморфных элементов и других тонкопленочных фотоэлектрических преобразователей коэффициент заполнения ВАХ 0,4–0,7. Чем больше коэффициент заполнения ВАХ, тем меньше потери в элементе из-за внутреннего сопротивления.

График на рисунке 1.10 иллюстрирует ВАХ элементов с раз-

личным коэффициентом заполнения. Как видно, обе кривые имеют одинаковые значения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода, однако элемент с меньшим коэффициентом заполнения ВАХ (нижний график) вырабатывает меньше мощности в ТММ.

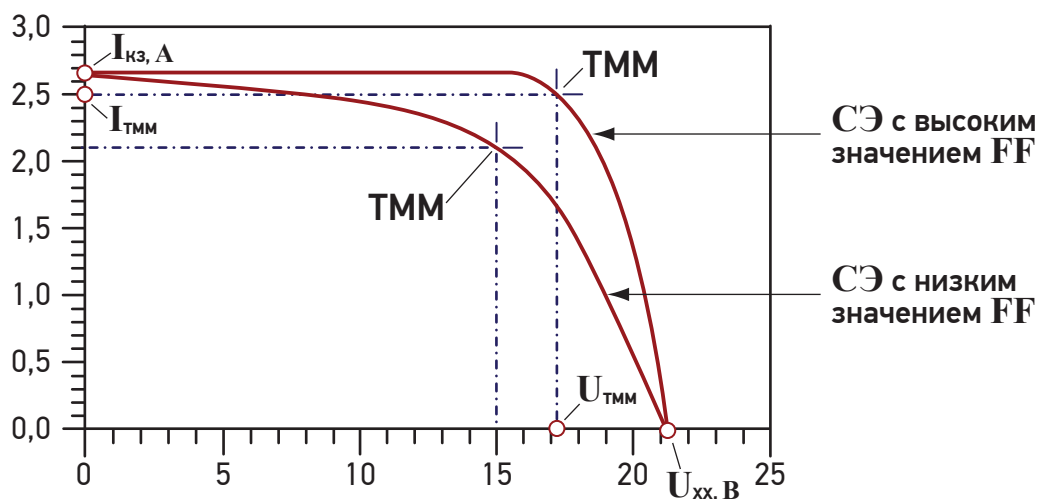


Рис. 1.10. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) солнечных элементов с различным коэффициентом заполнения

При изготовлении каждый солнечный элемент тестируется и при этом измеряется его ВАХ и коэффициент заполнения. Если последний меньше 0,7, то элемент классифицируется как Grade В и продается производителям супердешевых панелей, которые должны уведомлять покупателей о низком качестве элементов.

- Коэффициент полезного действия (КПД) является самым распространенным параметром, по которому можно сравнить производительность двух солнечных элементов. Он определяется как отношение мощности, вырабатываемой солнечным элементом, к мощности падающего солнечного излучения. Кроме собственно производительности солнечного элемента, КПД также зависит от спектра и интенсивности падающего солнечного излучения и температуры солнечного элемента. Поэтому для сравнения двух солнечных элементов нужно тщательно выполнять при-

нятые стандартные условия. КПД солнечного элемента определяется как часть падающей энергии, преобразованной в электричество [3]:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{пад}}} \cdot 100\% \quad (1.4)$$

где P_{\max} – максимальная мощность солнечного элемента, Вт (формула (1.2)); $P_{\text{пад}}$ – мощность падающего солнечного излучения, Вт.

1.3. Типы солнечных элементов

Наибольшее распространение в фотоэлектрических установках получили кремниевые элементы трех видов на основе монокристаллического (КПД до 21,5%), поликристаллического (КПД 14-17%) и аморфного кремния (КПД 5-8%) (рис. 1.11) [6]. Различие между этими видами в том, как организованы атомы кремния в кристалле.

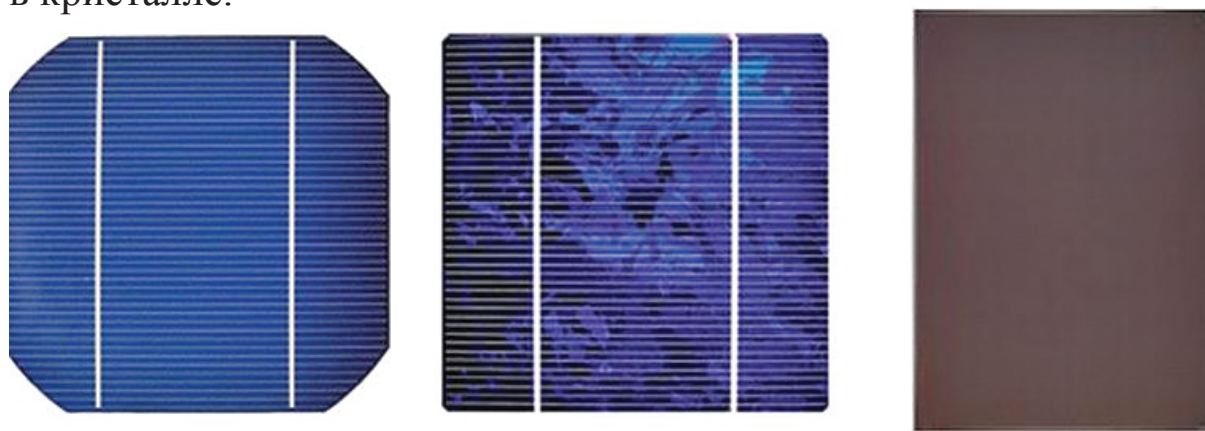
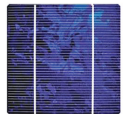




Рис. 1.11. Монокристаллические, поликристаллические и аморфные солнечные элементы

В фотоэлектрических элементах имеется задний контакт и 2 слоя кремния разной проводимости, сверху сетка из металлических контактов и антибликовое просветляющее покрытие, которое дает солнечному элементу характерный синий оттенок. Типичные размеры солнечных элементов (СЭ) и их электрические параметры приведены в табл. 1.1 [6,7].

Типичные размеры солнечных элементов и их электрические параметры

Тип СЭ	Размер СЭ, мм	КПД, %	Максимальная мощность ($P_{ТММ}$), Вт	Напряжение холостого хода ($U_{ХХ}$), В	Ток короткого замыкания ($I_{КЗ}$), А
6" multi 	156×156	16,4	3,99	0,618	8,27
		16,2	3,94	0,616	8,21
		⋮	⋮	⋮	⋮
		15,0	3,65	0,607	7,77
6" mono 	156×156	17,6	4,21	0,624	8,63
		17,4	4,16	0,623	8,57
		⋮	⋮	⋮	⋮
		16,0	3,82	0,613	8,08
5" mono 	125×125	17,4	2,59	0,621	5,35
		17,2	2,56	0,619	5,31
		⋮	⋮	⋮	⋮
		16,0	2,38	0,607	5,08

В солнечной энергетике одним из перспективных материалов для создания высокоэффективных фотоэлектрических элементов является арсенид галлия (GaAs). Такие элементы обладают высоким КПД (для однопереходных элементов около 28 % [6]). Отдельно можно выделить элементы, использующие органические материалы. Фотоэлектрические элементы на основе диоксида титана (TiO_2), покрытые органическим красителем, имеют КПД около 11 % [6]. Принцип работы элемента основан на фотовозбуждении красителя и быстрой инжекции электрона в зону проводимости TiO_2 .

В последние годы разработаны новые типы материалов для тонкопленочных фотоэлектрических элементов, например, медь-индий-диселенид и теллурид кадмия (CdTe). Такие солнечные

элементы в последнее время широко используются. Технологии их производства постоянно развиваются, за последнее десятилетие КПД тонкопленочных элементов вырос примерно в 2 раза.

Последние технологии используют гибридные методы. Так появились элементы, которые имеют как кристаллический переход, так и тонкий полупрозрачный аморфный, расположенный над кристаллическим. Так как кристаллы и аморфный кремний наиболее эффективно преобразуют только часть спектра света и эти спектры немного отличаются, применение таких гибридных элементов позволяет повысить общий КПД солнечного элемента. В лабораториях уже получен КПД порядка 45% [6]. Конечно, до массового использования такие технологии дойдут еще не скоро, но работа по удешевлению изготовления солнечных элементов постоянно ведется во всем мире.

1.4. Солнечные панели

Солнечные панели (они же фотоэлектрические или солнечные модули) состоят из солнечных элементов. Так как один солнечный элемент не производит достаточного количества электроэнергии, несколько таких элементов собирают в солнечные панели, чтобы производить больше электричества (рис. 1.12).

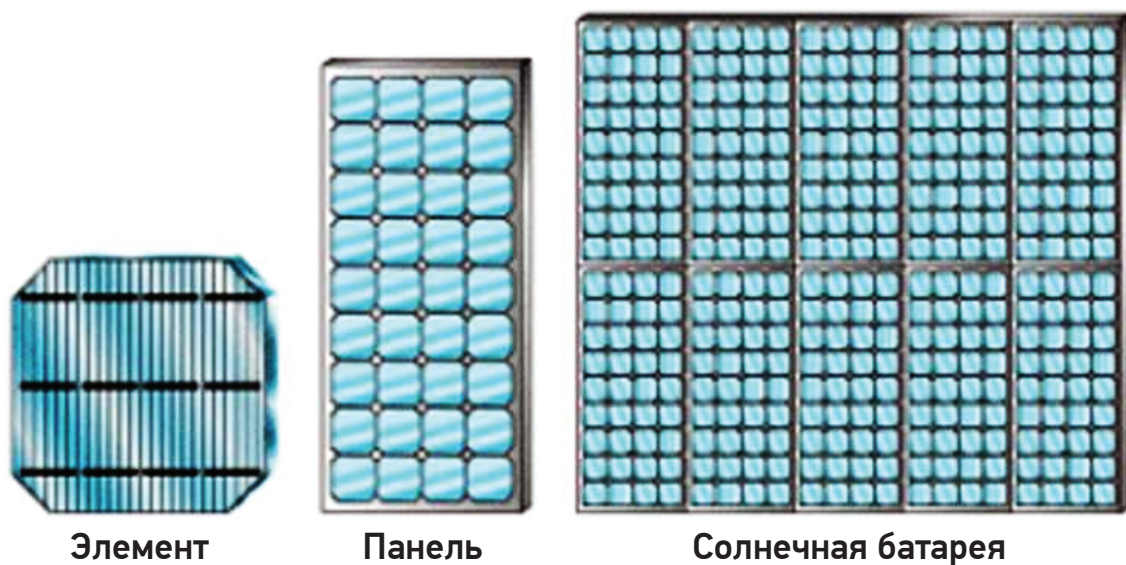


Рис. 1.12. Солнечный элемент, солнечная панель (фотоэлектрический модуль), солнечная батарея

Панель представляет собой фотоэлектрический генератор, состоящий из стеклянной плиты, с тыльной стороны которой между двумя слоями герметизирующей пленки размещены солнечные элементы, электрически соединенные между собой металлическими шинами. Нижний слой герметизирующей пленки защищен от внешних воздействий защитным слоем. К внутренней стороне корпуса панели прикреплен блок терминалов, под крышкой которого размещены электрические контакты для подключения (рис. 1.13).

Герметизирующий материал необходим, чтобы обеспечить полную герметичность солнечных элементов при работе на открытом воздухе круглый год. При попадании воздуха или влаги внутрь солнечной панели происходит окисление и разрушение контактов солнечных элементов, что приводит к выходу панели из строя. В качестве герметизирующей обычно применяется этиленвинилацетатная (EVA) пленка. К сожалению, она же и является одним из факторов старения фотоэлектрических панелей, так как со временем теряет свою прозрачность. Сейчас во всем мире ведутся работы по замене EVA-пленки на другие материалы, но пока, в основном, применяется именно этот материал.

Солнечные панели производятся многих типов и размеров. Наиболее типичные – кремниевые солнечные панели мощностью 40–260 Вт_{пик} (то есть с максимальной мощностью 40–260 Вт при

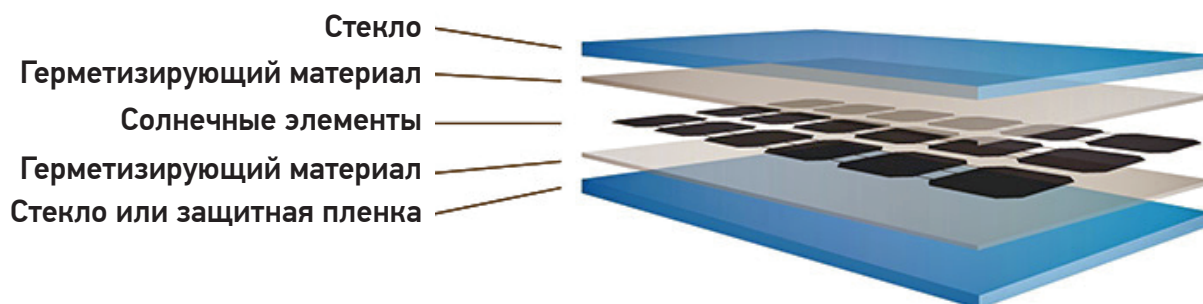


Рис. 1.13. Структура солнечной панели

ярком солнце) [1]. Такая солнечная панель имеет размер от 0,4 до 2,5 м². Панели могут соединяться между собой в солнечные батареи для большей мощности (например, две панели по 50 Вт_{пик}, соединенные вместе, эквивалентны панели мощностью 100 Вт_{пик}).

КПД панелей колеблется от 5 до 20% [6], то есть именно такое количество солнечной энергии будет трансформировано в электричество.

1.5. Электрические характеристики солнечной панели

Солнечная панель может работать при любой комбинации напряжения и тока. Однако в реальности она работает в одной точке в данное время. Эта точка выбирается не панелью, а электрическими характеристиками цепи, к которой данная панель (или солнечная батарея) подключена.

На практике солнечная панель работает при комбинации тока и напряжения, когда вырабатывается достаточная мощность. Лучшее их сочетание называется точкой максимальной мощности (ТММ). Соответствующие напряжение и ток обозначаются U_p (номинальное напряжение) и I_p (номинальный ток). Именно для этой точки определяются номинальная мощность и КПД солнечной панели.

При прямом соединении солнечной панели к аккумуляторной батарее (АБ) она работает при напряжении, равном напряжению аккумуляторной батареи в данный момент. По мере заряда АБ ее напряжение растет, поэтому панель может работать в диапазоне от 10 до 14,5 В (для панели с номинальным напряжением 12 В; для панелей с номинальным напряжением 24 В значения напряжения нужно умножить на 2). Почему нельзя сделать панели так, чтобы они выдавали 12 В? Если сделать так, то панели будут выдавать необходимое для заряда АБ напряжение только когда они

холодные, в идеальном состоянии и при ярком солнце. Обычно таких условий не бывает в реальности. Поэтому панели должны иметь запас по напряжению для возможности заряжать АБ при пониженной освещенности, под пылью и нагретыми на солнце. Вопреки логике, солнечные панели работают лучше в холодную погоду. В нормальных условиях, когда солнечная панель нагревается до 40–45 °С, ее мощность снижается на 15–17% [7].

Итак, для заряда АБ напряжением 12 В необходимо довести напряжение панели до 14,5 В (или даже до 15 В при заряде при низких температурах). Напряжение солнечной панели в реальных условиях оказывается ниже номинального. Во-первых, при нагревании солнечной панели ее напряжение снижается примерно на 0,5 В. Во-вторых, существуют потери напряжения в соединительных проводах. Также редко бывает, что уровень освещенности равен 1000 Вт/м². Все это приводит к тому, что реальное напряжение на панели снижается, и в действительности оказывается очень близким к 14,5 В. С другой стороны, при низких температурах напряжение может быть больше номинального.

1.6. Номинальная мощность солнечной панели

Солнечный элемент (СЭ) производит электричество, когда освещается светом. В зависимости от интенсивности света 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 панелей необходимо знать так называемую номинальную мощность элемента или панели. Номинальная мощность, выраженная в Ваттах пиковой мощности ($Вт_{\text{пик}}$), это мера того, сколько электроэнергии может произвести солнечная панель при оптимальных условиях.

Чтобы можно было сравнить панели между собой, производители договорились испытывать их при определенных условиях. Изначально были введены Standard Test Conditions (STC), то есть так называемые «стандартные тестовые условия».

Параметры STC отражают работу солнечной панели в идеальных условиях, которые обычно достигаются при кратковременной вспышке тестера солнечных панелей в заводских или лабораторных условиях. При этом освещенность должна быть 1000 Вт/м^2 , температура солнечной панели $25 \text{ }^\circ\text{C}$, спектр излучения должен соответствовать массе воздуха AM1.5, а скорость ветра должна быть равна нулю [7, 8].

Именно параметры при STC обозначены на шильдике всех солнечных панелей (рис. 1.14). Они являются обязательными для всех производителей. Если говорится о мощности солнечной батареи, то указывается мощность при STC.


 InEcoEnergo.com	
Model Type	G200M-36
Rated Max Power (Pmax)	200W
Current at Pmax (Imp)	5.82A
Voltage at Pmax (Vmp)	34.4V
Short-Circuit Current (Isc)	6.31A
Open-Circuit Voltage (Voc)	43.2V
Normal Operating Cell Temp (Tnoct)	45°C
Weight	14.00kg
Max System Voltage	1000V DC
All technical data at standard test conditions AM=1.5 E=1000W/m² Tc=25°C	

Рис. 1.14. Информация на шильдике солнечной панели

Однако условия STC редко встречаются при реальной эксплуатации солнечных панелей. Если вы установили на своей крыше панель номинальной мощностью 250 Вт, это совсем не значит, что вы получите от нее мощность в 250 Вт при любых условиях. STC не отражают эффективность и производительность солнечной панели в реальных условиях. Поэтому делаются попытки определить условия, при которых параметры панели ближе к тем, которые имеют место в действительности.

В последнее время все больше производителей указывают параметры панели в «нормальных условиях» (NOCT), то есть при температуре панели 40–45 °С и освещенности 800 Вт/м². Тем не менее, NOCT также не отражает реальную мощность панели, так как во время работы солнечной батареи освещенность может быть даже выше 1000 Вт/м², а температура существенно ниже 45 °С [7,8].

Все чаще для сравнения панелей вместо STC применяются тестовые условия PVUSA (Photovoltaics for Utility Systems Applications) Test Conditions (PTC), которые являются более реалистичными. Однако далеко не все производители указывают параметры при PTC. Обычно PTC указывается для панелей, произведенных для американского рынка.

Параметры испытаний PTC показывают результаты тестов солнечных панелей в условиях, более приближенных к реальным, чем STC. PTC также подразумевают освещенность в 1000 Вт/м², но вот температура нормируется не самого солнечного элемента, как в STC, а окружающего воздуха. Панели должны находиться на высоте 10 м над уровнем земли, температура воздуха должны быть 20 °С, а скорость ветра должна быть 1 м/с [7,8].

Параметры PTC меньше на 10–15%, чем STC, что отражает влияние реальных условий эксплуатации солнечных панелей.

Однако ни PTC, ни STC не отражают всех факторов, которые влияют на изменение мощности панелей в реальных условиях. Надо учитывать и другие факторы, влияющие на производительность солнечной электростанции, например, потери в проводах, в инверторе, контроллере и т.п. Также это может быть нормальная деградация солнечных панелей с течением времени, снижение мощности за счет пыли, грязи, чрезмерного нагрева панелей или их затенения, разность мощности панелей в последовательных цепочках и т.п. Влияние этих факторов может меняться в зависимости от сезона, географического положения, способа монтажа, азимута и наклона панелей. Так что в реальных условиях солнечная панель будет вырабатывать около 75–85% от ее пиковой мощности (указанной на шильдике). То есть солнечная панель мощностью 100 Вт, расположенная под оптимальным углом и ориентированная на юг, будет выдавать летом в среднем 75–85 Вт, в зависимости от метода установки. Конечно, будут дни, когда вы получите полную пиковую мощность от солнечной панели или даже больше неё. Это нужно учитывать при проектировании солнечной электростанции.

Мощность солнечной панели изменяется в зависимости от освещенности практически прямо пропорционально (рис. 1.15). При некотором значении освещенности панель может прекратить выработку. Например, для кристаллических панелей это, примерно, 150–200 Вт/м², а для аморфных – около 100 Вт/м² [8].

Также мощность солнечной панели зависит от ее температуры и обычно падает при её повышении (рис. 1.16). Типичный температурный коэффициент для кристаллических панелей составляет –0,45 %/К (то есть при повышении температуры панели на каждый градус ее выработка уменьшается на 0,45%) [8]. Для аморфных панелей этот показатель обычно в 2 раза меньше, а послед-

ние разработки трех-переходных аморфных панелей даже имеют положительный температурный коэффициент мощности.

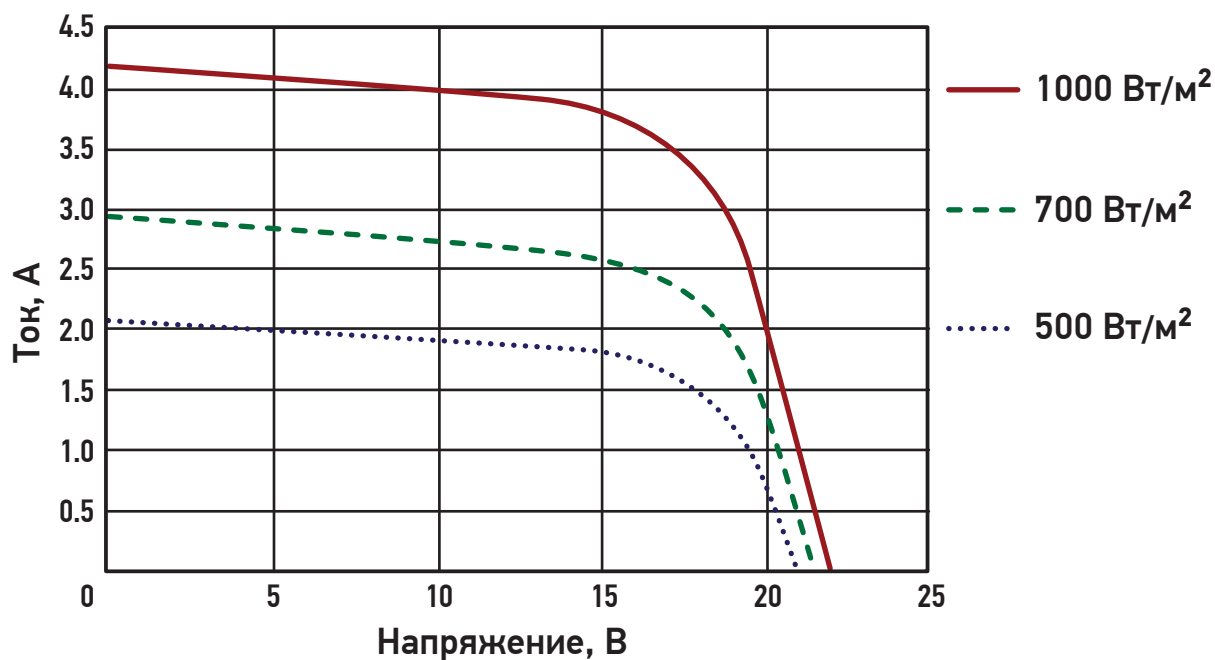


Рис. 1.15. Вольт-амперная характеристика солнечной панели в зависимости от освещенности

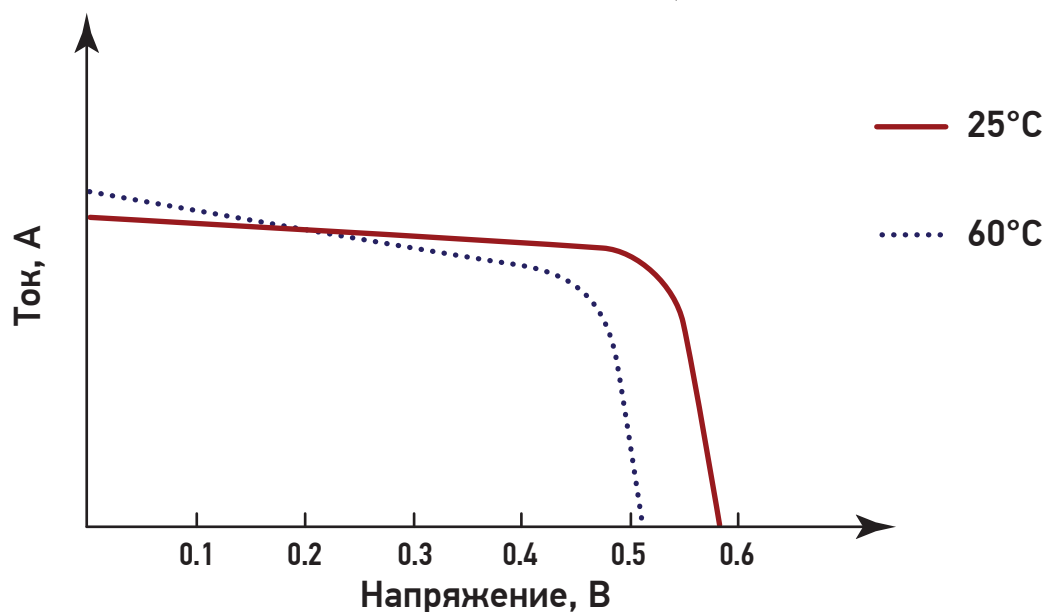


Рис. 1.16. Вольт-амперная характеристика солнечной панели в зависимости от температуры панели

Солнечная панель под действием света вырабатывает не только электроэнергию, но и тепло. В обычной солнечной панели в точке максимальной мощности только 10–15% падающей на нее солнечной энергии преобразуется в электричество, остальное

превращается в тепло [8]. Факторами, влияющими на нагревание солнечной панели, являются:

- Отражение от лицевой поверхности.

Свет, отраженный от лицевой поверхности солнечной панели, не участвует в производстве электроэнергии. Такой свет считается источником потерь, которые нужно минимизировать. Он также и не нагревает панель. Поэтому максимальный нагрев панели рассчитывается, как мощность падающего солнечного излучения, умноженная на коэффициент отражения. Для обычной солнечной панели со стеклянной лицевой поверхностью коэффициент отражения составляет около 4%.

- Рабочая точка и КПД панели.

Рабочая точка и эффективность панели определяют, какая часть света, поглощенного панелью, будет преобразована в электричество. Если солнечный элемент работает в режиме короткого замыкания или холостого хода, то он не производит электроэнергии, и потому вся поглощенная энергия переходит в тепло.

- Поглощение света в панели.

Свет, который поглощается в панели не солнечным элементом, также будет участвовать в ее нагреве. Количество поглощенного и отраженного света определяется цветом и материалом заднего слоя панели.

- Поглощение инфракрасного света.

Свет с энергией меньше энергии запрещенной зоны солнечного элемента не влияет на электрическую мощность, но если он поглотится в солнечном элементе или в панели, он будет способствовать их нагреванию. Инфракрасный свет хорошо поглощается алюминием на задней поверхности солнечного элемента. В элементах, у которых нет алюминия на задней поверхности, инфракрасный свет не поглощается и может пройти через панель насквозь.

- Уровень заполнения панели солнечными элементами.

Солнечные элементы создаются специально, чтобы эффективно поглощать солнечное излучение. Они будут производить значительное количество тепла, обычно больше остальных частей панели. Поэтому более высокий уровень заполнения панели солнечными элементами увеличивает количество тепла, производимого на единицу поверхности.

1.7. Сравнение аморфных и кристаллических солнечных панелей

Аморфные (тонкопленочные) солнечные элементы бывают следующих основных типов:

- 1) из аморфного кремния (a-Si) или тонкопленочного кремния (TF-Si);
- 2) из теллурида кадмия (CdTe);
- 3) из деселенида галлия-меди-индия (CIS или CIGS);
- 4) из синтетических (dye-sensitized solar cell) материалов с органическими добавками.

Тонкопленочные солнечные элементы включают примерно шесть слоев. Прозрачное покрытие закрывает антиотражающий слой, затем идут полупроводники *p*- и *n*-типа, контактный слой и подложка. Принцип работы тонкопленочных солнечных элементов такой же, как и у кристаллических солнечных элементов.

Тонкопленочные панели, в общем случае, должны быть дешевле кристаллических за счет меньшего расхода кремния и более простой технологии изготовления. Однако на практике разница в цене не очень большая, так как в последние годы стоимость кристаллических солнечных панелей сильно снизилась. Эффективность обеих технологий быстро растет, а различие в цене уменьшается. Более того, тонкопленочные панели обычно

выполняются с использованием двух слоев стекла, поэтому они могут быть даже дороже кристаллических панелей той же мощности и намного тяжелее. Есть другой тип тонкопленочных солнечных панелей, в которых полупроводниковый слой нанесен на гибкую основу. Такие панели легкие и их можно изгибать. Обычно они используются в переносных системах или на кровлях со сложной формой. В таблице 1.2 приведено очень короткое сравнение этих двух технологий [9].

Основное отличие кристаллических и тонкопленочных панелей – в их КПД. Также у кристаллических элементов дольше срок службы. Расходы на установку кристаллических панелей меньше, так как для одной и той же мощности нужно устанавливать примерно в два раза меньше по площади панелей.

К недостаткам кристаллических панелей можно отнести высокую стоимость исходного материала (кристаллического кремния), его хрупкость. Установка тонкопленочных панелей на гибкой основе требует определенных навыков у монтажников. Однако нужно отметить, что в реальных условиях панели из аморфного кремния вырабатывают больше энергии с пикового Ватта, чем моно- и поликристаллические солнечные панели.

В таблице 1.3 приведено некоторое сравнение моно- и поликристаллических солнечных панелей [7,8].

Однозначного ответа на вопрос, какой из типов панелей работает лучше, нет, так как:

- Монокристаллические панели имеют наибольшую эффективность и удовлетворительные температурные коэффициенты.
- Поликристаллические панели в настоящее время наиболее популярны, поскольку имеют меньшую стоимость за 1 Ватт при почти таких же характеристиках, как и монокристаллические. Последние улучшения в технологии поликристаллических пане-

Таблица 1.2

Сравнение тонкопленочных и кристаллических солнечных панелей

Параметр	Кристаллические панели	Тонкопленочные панели
Разновидности технологии	Монокристаллический кремний (с-Si). Поликристаллический кремний (pc-Si/ mc-Si). String Ribbon	Аморфный кремний (a-Si). Теллурид кадмия (CdTe). Деселенид галлия-меди-индия (CIG/ CIGS). Органические элементы (OPV/ DSC/ DYSC).
Отношение напряжения в рабочей точке к напряжению холостого хода (U_p/U_{xx}) (выше – лучше, так как меньше разница между U_{xx} и U_p)	80%–85%	72%–78%
Температурные коэффициенты (низкий температурный коэффициент лучше при работе при высоких температурах окружающей среды)	выше (–0,4%/градус, –0,5%/градус)	ниже (–0,1%/градус, –0,2%/градус)
Заполнение вольт-амперной характеристики (идеальный элемент имеет 100%-ное заполнение)	73%–82%	60%–68%
Конструкция панели	В раме из анодированного алюминия	Без рамы, между 2 стеклами – цена ниже, вес больше; на гибком основании – легче, дешевле
КПД панели	13%–19%	4%–12%
Типовое применение	Жилые дома; коммерческие объекты; генерация в сеть	Жилые дома; коммерческие объекты; генерация в сеть
Требуемая площадь	Около 150 Вт/м ²	Может потребоваться до 50% больше площади для той же мощности солнечной батареи

лей привели к тому, что их параметры могут быть даже лучше, чем у монокристаллических.

- Аморфные (тонкопленочные) панели используют наименьшее количество кремния. Имеют примерно в 2 раза меньший КПД по сравнению с кристаллическими панелями. К преимуществ-

Таблица 1.3

Сравнение моно- и поликристаллических солнечных панелей

Параметр	Монокристаллические панели	Поликристаллические панели
Кристаллическая структура солнечного элемента (СЭ)	Все кристаллы ориентированы в одном направлении, зерна кристаллов параллельны	Кристаллы ориентированы в разных направлениях, зерна кристаллов не параллельны
Технология производства СЭ	Монокристаллические цилиндры кремния нарезаются на пластины, затем пластины обрезаются до почти квадратной формы	Поликристаллические заготовки прямоугольной формы режутся на пластины
Температуры изготовления СЭ	1400 °С	800–1000 °С
Форма СЭ	Прямоугольная, с обрезанными углами (квази-прямоугольные)	Прямоугольная или квадратная
Толщина СЭ	≤300 мкм	300–500 мкм
КПД СЭ	15%–23%	12%–17%
Стабильность параметров СЭ	Высокая стабильность	Высокая стабильность, но ниже, чем у монокристаллических элементов
Цена солнечной панели	Относительно высокая	Относительно высокая, но на 15–20% ниже, чем у монокристаллических элементов
Окупаемость по энергии	2 года	2–3 года

вам можно отнести низкий температурный коэффициент (т.е. при нагревании мощность таких панелей падает незначительно) и большую чувствительность при низкой освещенности.

1.8. Срок службы солнечных панелей

Солнечные панели были испытаны в полевых условиях на многих установках. Практика показала, что срок службы солнечных панелей превышает 20 лет. Фотоэлектрические станции, работающие в Европе и США около 25 лет, показали снижение мощности панелей примерно на 10%. Таким образом, можно говорить о реальном сроке службы солнечных монокристаллических панелей 30 и более лет. Поликристаллические панели обычно работают 20 и более лет. Панели из аморфного кремния (тонкопленочные или гибкие) имеют срок службы от 7 (первое поколение тонкопленочных технологий) до 20 (второе поколение тонкопленочных технологий) лет. Более того, тонкопленочные панели обычно теряют от 10% до 40% мощности в первые два года эксплуатации. Поэтому около 90% рынка солнечных панелей в настоящее время составляют кристаллические кремниевые панели [7,8].

Проблемы и ухудшение параметров солнечных панелей могут быть вызваны следующими причинами.

1) *Качество солнечного элемента.* Эффективность зависит от множества параметров солнечного элемента: шунтового и последовательного сопротивлений, шумовых токов, обратного сопротивления и других параметров. Многое зависит от качества производства солнечного элемента и применяемых при его изготовлении материалов и оборудования. Известны проблемы практически на каждом этапе производства элемента, касающиеся, в частности, качества применяемого кремния, контактных паст и припоя.

2) *Качество пайки солнечных элементов.* При некачественной пайке возможен локальный перегрев контакта и его прогорание. Лучше выбирать панели, в которых элементы спаяны роботом – в них разброс качества пайки будет минимальным.

3) *Качество этиленвинилацетатной (EVA) пленки,* которая расположена между элементами и стеклом. Старение кристаллических солнечных панелей, в основном, связано с износом и помутнением этой пленки. Некачественная пленка может начать мутнеть и разрушаться уже через несколько лет. Хорошая пленка будет служить 30 и более лет, при этом ее помутнение (следовательно, потеря мощности панелью) не будет превышать 25-30%.

4) *Качество герметизации панели и качество задней защитной пленки.* Задняя пленка защищает панель от попадания влаги. В любой панели происходит диффузия влаги через пленку. Если качество пленки хорошее, то вся влага, которая попадает внутрь панели, при ее нагревании на солнце выводится наружу. Если же пленка некачественная, то влаги попадает больше, чем может выйти при нагреве, и остаточная влага накапливается внутри панели, разрушает контакты и контактную сетку элементов. Это приводит к преждевременному выходу панели из строя.

5) *Качество алюминиевой рамы.* Некачественное анодирование может приводить к окислению рамы и ее коррозии. К счастью, этот дефект больше визуальный и вряд ли приведет к преждевременному выходу панели из строя. Хотя в некоторых случаях (например, при установке панелей на мачтах, где возможны сильные ветровые нагрузки или там, где среда агрессивная) ускоренная коррозия металла может привести к разрушению.

Другие компоненты системы имеют различные сроки службы: аккумуляторные батареи от 2 до 15 лет, а силовая электроника – от 5 до 20 лет.

1.9. Фотоэлектрические системы

Чтобы солнечные панели были надежным источником электроэнергии, необходимы дополнительные элементы в системе: кабели, поддерживающая структура и, в зависимости от типа системы (соединенная с сетью, автономная или резервная), еще и электронный инвертор и контроллер заряда с аккумуляторной батареей. Такая система в целом называется солнечной фотоэлектрической системой или солнечной станцией.

Есть три основных типа солнечных фотоэлектрических систем [7,8]:

- Автономные, обычно применяемые для электроснабжения отдельных домов.
- Соединенные с сетью.
- Резервные.

1.9.1. Автономные фотоэлектрические системы

Автономные фотоэлектрические системы используются там, где нет сетей централизованного электроснабжения. Для обеспечения энергией в темное время суток или в периоды без яркого солнечного света необходима аккумуляторная батарея (АБ). Автономные фотоэлектрические системы часто используются для электроснабжения отдельных домов. Малые системы позволяют питать базовую нагрузку (освещение и иногда телевизор или радио), более мощные системы могут также питать водяной насос, радиостанцию, холодильник, электроинструмент и т.п. Такая система состоит из солнечной панели, контроллера, аккумуляторной батареи, кабелей, электрической нагрузки и поддерживающей структуры (рис. 1.17).

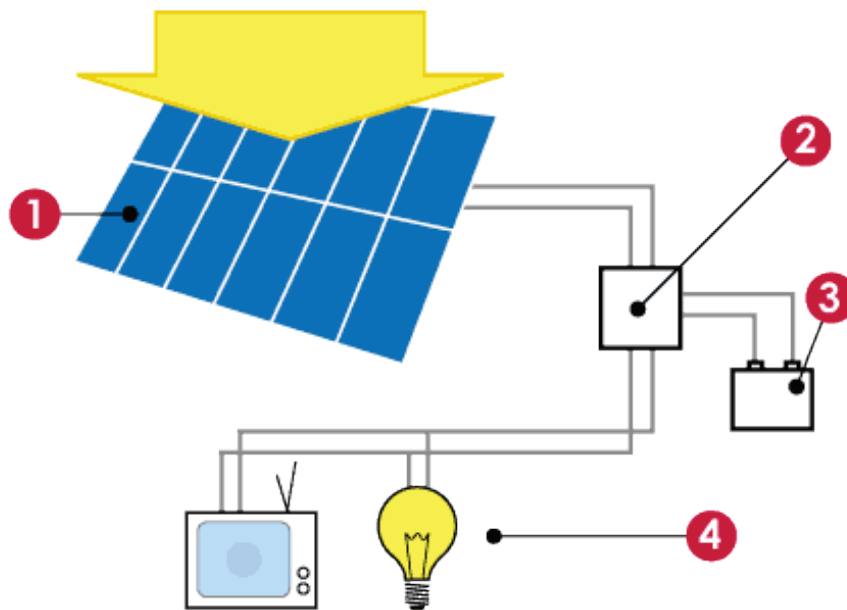


Рис. 1.17. Автономная фотоэлектрическая система:
 1 – солнечные панели; 2 – контроллер; 3 – АБ; 4 – нагрузка

1.9.2. Соединенные с сетью солнечные фотоэлектрические системы

Когда есть сеть централизованного электроснабжения, но есть желание иметь электроэнергию от чистого источника, солнечные панели могут быть соединены с сетью. При подключении достаточного количества солнечных панелей определенная часть нагрузки в доме может питаться от солнечного электричества. Соединенные с сетью фотоэлектрические системы обычно состоят из одной или нескольких панелей, инвертора, кабелей, поддерживающей структуры и электрической нагрузки (рис. 1.18). Инвертор используется для соединения солнечных панелей с сетью. Существуют также так называемые АС-панели, в которых инвертор встроен в её заднюю часть.

Избыток электрической энергии может продаваться электросетям. Если используются специальные повышенные тарифы для солнечного электричества, то устанавливают два счетчика – один на генерацию, другой на потребление. При этом вся электроэнер-

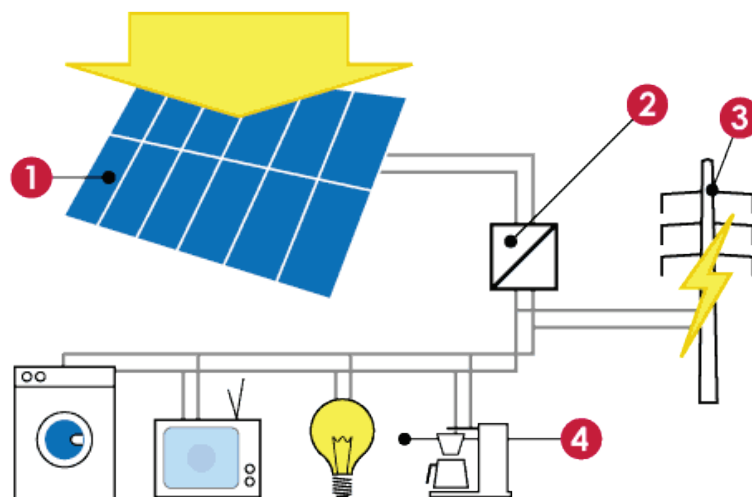


Рис. 1.18. Соединенная с сетью солнечная фотоэлектрическая система:
 1 – солнечные панели; 2 – инвертор; 3 – сеть; 4 – нагрузка

гия, выработанная солнечной панелью, продается сетям по повышенной цене, а потребности дома в электроэнергии обеспечиваются покупкой электроэнергии у сетей по обычной цене. Таким образом можно обеспечить не только нулевые расходы по затратам на электроэнергию в течение года, но и нулевое потребление электроэнергии за год (летом избыток энергии поставляется сетям, а зимой, при недостатке солнца, дом питается в основном от сетей).

1.9.3. Резервные системы

Резервные солнечные системы используются там, где есть соединение с сетью централизованного электроснабжения, но она ненадежна. Резервные системы могут использоваться для электроснабжения в периоды, когда нет напряжения в сети. Малые резервные солнечные системы электроснабжения могут использоваться для освещения, снабжения энергией компьютера и средств связи (телефон, радио, факс и т.п.). Более крупные системы могут снабжать энергией и холодильник во время отключения сети. Чем больше мощность, необходимая для питания ответственной нагрузки, и чем дольше периоды отключения сети, тем

большая мощность фотоэлектрической системы необходима. Если сеть есть, то система обычно работает как соединенная с ней.

Система состоит из солнечных панелей, контроллера, аккумуляторной батареи (АБ), кабелей, инвертора, нагрузки и поддерживающей структуры (рис. 1.19).

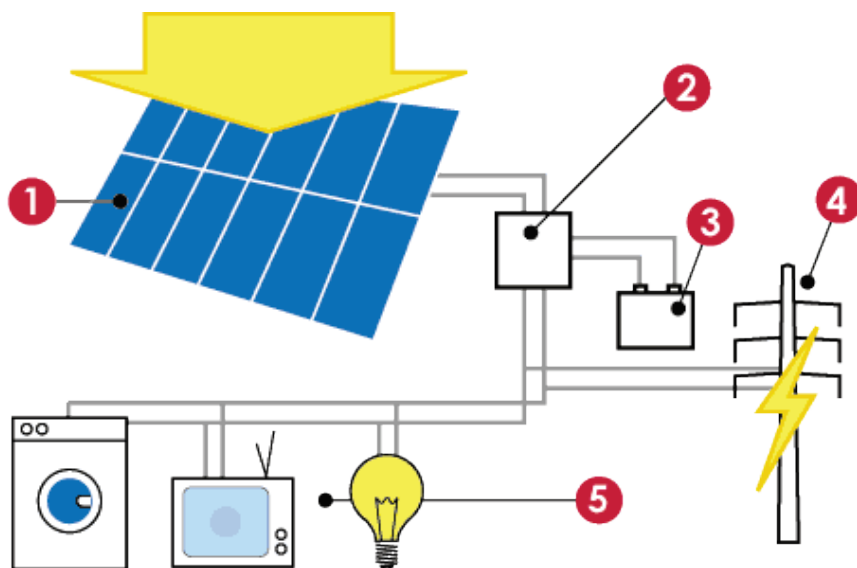


Рис. 1.19. Резервные системы:
1 – солнечные панели; 2 – инвертор; 3 – АБ; 4 – сеть; 5 – нагрузка

1.10. Поддерживающая конструкция

Важной частью солнечной фотоэлектрической системы является поддерживающая конструкция для солнечных панелей. Она обеспечивает правильный угол наклона панелей и необходимую жесткость всей системы. Комбинация поддерживающей конструкции с солнечными панелями должна выдерживать порывы ветра и другие воздействия окружающей среды. Разнообразие конструкций огромно – от самодельных до промышленно изготавливаемых для больших фотоэлектрических систем. Такая конструкция может быть изготовлена из металла или синтетического материала.

Есть несколько типов поддерживающих конструкций, в зави-

симости от места установки фотоэлектрической системы. Для соединенных с сетью систем это может быть плоская конструкция или с малым наклоном крышная или для фасада здания. Соединенные с сетью системы также могут быть элементом конструкции здания (интегрированные солнечные системы).

1.11. Контроллеры заряда-разряда

Контроллеры заряда используются в автономных фотоэлектрических системах для защиты аккумуляторных батарей от глубокого разряда, когда есть перерасход энергии, или перезаряда, когда батарея заряжена, а солнечная панель вырабатывает избыток электричества (рис. 1.20). Использование контроллеров заряда необходимо, потому что он отключает нагрузку, когда аккумулятор недопустимо разряжен. Обычно контроллером заряда снабжаются фотоэлектрические солнечные комплекты. При этом нагрузка никогда не подключается напрямую к аккумуляторной батарее, минуя контроллер заряда, иначе аккумуляторная батарея может выйти из строя.



Рис. 1.20. Контроллер заряда-разряда

1.11.1. Контроллеры с широтно-импульсной модуляцией тока заряда

Простейшие контроллеры просто отключают источник энергии (солнечную батарею), если напряжение на аккумуляторной батарее (АБ) достигло примерно 14,4 В (для АБ номинальным напряжением 12 В). При снижении напряжения на АБ до $\approx 12,5$ –13 В снова подключается солнечная батарея, и заряд возобновляется. При этом максимальный уровень заряженности АБ составляет 60–70%. При регулярном недозаряде происходит резкое сокращение срока службы АБ.

Современные контроллеры на завершающей стадии заряда используют так называемую широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) тока заряда. При этом возможен заряд АБ до 100%.

На рисунке 1.21 показаны четыре стадии заряда аккумуляторной батареи от солнечной батареи [7].

1) Заряд максимальным током. На этой стадии АБ получает весь ток, поступающий от солнечных панелей.

2) ШИМ-заряд. Когда напряжение на АБ достигает определенного уровня, контроллер начинает поддерживать постоянное напряжение за счет ШИМ-тока заряда. Это предотвращает перегрев и газообразование в аккумуляторе. Ток постепенно уменьшается по мере заряжения аккумуляторной батареи.

3) Выравнивание. Многие батареи с жидким электролитом улучшают работу при периодическом заряде до газообразования, при этом выравниваются напряжения на различных банках АБ, очищаются пластины и перемешивается электролит.

4) Поддерживающий заряд. Когда АБ полностью заряжена, зарядное напряжение уменьшается во избежание дальнейшего нагрева или газообразования в батарее, и она поддерживается в заряженном состоянии.



Рис. 1.21. Стадии заряда аккумуляторной батареи от солнечной панели

1.11.2. Контроллер со слежением за точкой максимальной мощности

Если необходимо увеличить выработку энергии солнечными батареями без добавления солнечных панелей, то нужно заменить солнечный контроллер на «Maximum Power Point Tracker» (MPPT) со слежением за точкой максимальной мощности (ТММ) солнечной батареи.

Типичный MPPT-контроллер постоянно отслеживает ток и напряжение на солнечной батарее, перемножает их значения и определяет пару ток-напряжение, при которых мощность солнечной батареи будет максимальной. Встроенный процессор также следит, на какой стадии заряда находится аккумуляторная батарея (наполнение, насыщение, выравнивание, поддержка), и на основании этого определяет, какой ток должен подаваться в неё. Одновременно процессор может давать команды на индикацию параметров на табло (при наличии), хранение данных, и т.п.

Точка максимальной мощности может вычисляться разными способами. Методы поиска точки максимальной мощности (ТММ) тоже различны [7].

1) Обычно используется метод «Perturb and Observe». То есть проводится периодическое полное сканирование всей вольт-

амперной характеристики солнечной батареи (обычно раз в два часа), находится ТММ, и до следующего полного сканирования контроллер ищет и вычисляет колебания мощности солнечной батареи и сдвигает рабочую точку на новое напряжение, если при нем мощность больше. Практически во всех контроллерах применяется именно этот метод. Недостатком его считается постоянная необходимость проводить измерения, во время которых генерация энергии от панелей прерывается. Различные производители подбирают параметры поиска – глубину и частоту итераций, периодичность полного сканирования, чтобы наиболее оптимально отслеживать точку максимальной мощности солнечной батареи и получать оптимальное количество энергии от Солнца.

2) Второй метод – «Scan and Hold». После первичного сканирования напряжение устанавливается на уровне найденной точки и держится до следующего полного сканирования. Такой метод хорош там, где нет облаков и затенения панелей. Преимущества – высокая скорость работы, практически нет прерывания генерации на измерения.

3) Третий метод – «Percentage of open circuit voltage». Замеряется напряжение холостого хода (U_{xx}), и рабочая точка выбирается на уровне ($U_{xx} \cdot k$), где k может быть от 0 до 1 (по умолчанию k равен 0,8). Точка держится до следующего сканирования. Такой метод хорош там, где нет облаков и затенения панелей. Преимущества – высокая скорость работы, практически нет прерывания генерации на измерения.

4) Четвертый метод – жесткий выбор рабочей точки. Назначается любое напряжение, которое контроллер будет поддерживать. Никаких измерений и вычислений он уже не делает, то есть работает постоянно. Недостаток – выбранное напряжение может быть далеко от реальной ТММ. Однако, если точно известно, при ка-

ком напряжении батарея вырабатывает максимальную мощность, и солнечная батарея работает практически постоянно при ясном небе, то можно использовать и этот метод. При запуске системы нужно задать напряжение, которое контроллер будет поддерживать; оно вычисляется по параметрам конкретной солнечной батареи.

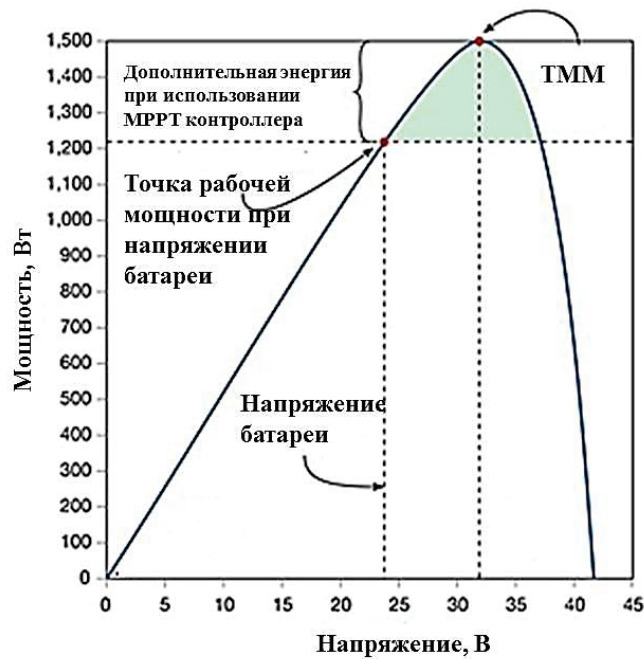
Положение ТММ зависит от освещенности панелей, температуры, разнородности используемых панелей и т.д. Контроллер периодически пытается немного «отойти» от найденной на предыдущей стадии точки в обе стороны, и если мощность при этом увеличивается, то он переходит на работу в этой точке. Теоретически, при поиске ТММ теряется немного энергии, но эта потеря очень незначительна, по сравнению с той дополнительной энергией, которую обеспечивает МРРТ-контроллер. Количество дополнительно полученной энергии при этом трудно определить однозначно. Основными факторами, влияющими на дополнительную выработку, являются температура и степень заряженности аккумуляторной батареи. Наибольшая добавка к выработке будет при низких температурах панели и разряженных батареях (рис. 1.22).

Напряжение солнечной панели в точке максимальной мощности может меняться при разных температурах панели (рис. 1.23).

Чем горячее солнечная панель, тем меньше напряжение, а значит, и выработка энергии солнечной батареей. В какие-то моменты точка максимальной мощности может быть ниже напряжения на АБ, и в этом случае нет никакого выигрыша по сравнению с обычным контроллером. Это же происходит и при частичном затенении солнечной батареи.

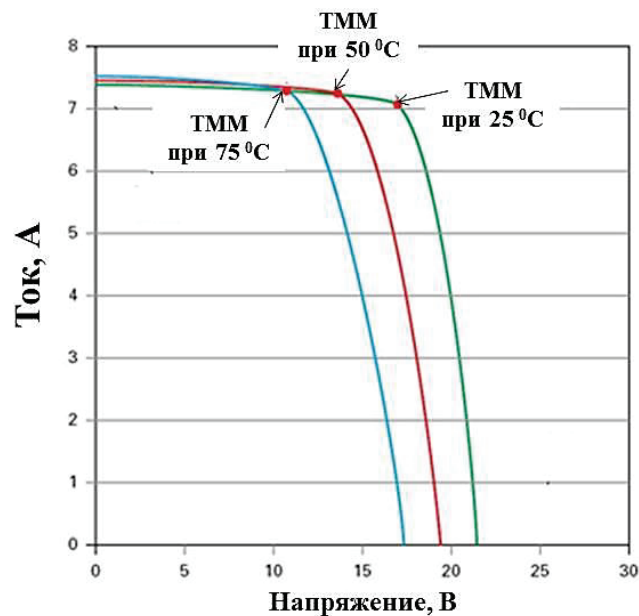
Текущая цена МРРТ-контроллеров позволяет эффективно их

применять при мощности панелей от 200 Вт или нестандартном напряжении панели.



Номинальная мощность солнечной батареи – 1800 Вт Номинальное напряжение солнечной батареи – 24 В Номинальное напряжение аккумуляторной батареи – 24 В

Рис. 1.22. Количество дополнительно полученной энергии при использовании МРРТ-контроллера



Номинальная мощность солнечной панели – 120 Вт Уровень освещенности – 1000 Вт/м²
Номинальное напряжение солнечной панели – 12 В

Рис. 1.23. Напряжение солнечной панели в точке максимальной мощности в зависимости от температуры панели

1.12. Инверторы для фотоэлектрических систем

Инверторы используются для преобразования постоянного тока от аккумуляторных батарей (АБ) или солнечных панелей в переменный, аналогичный току в сетях централизованного электроснабжения.

В соединенных с сетью системах инверторы принимают энергию от солнечных панелей и преобразуют ее в переменный ток, который подается в сеть. Большинство солнечных панелей генерируют постоянный ток. Есть панели с интегрированными инверторами, так называемые АС-панели с микроинверторами (рис. 1.24). Их преимуществом является простая настройка и возможность легкого масштабирования фотоэлектрической системы путем простого добавления таких панелей. Такие инверторы используются только в соединенных с сетью системах.

В автономных системах для питания стандартных бытовых устройств и приборов нужно преобразовать постоянный ток от АБ и солнечных батарей в переменный напряжением 220 В.



Рис. 1.24. Микроинвертор на задней стороне солнечной панели

В резервных системах та же задача – преобразовать постоянный ток от АБ в переменный для питания обычных приборов.

Есть много различных инверторов, отличающихся мощностью и типом. Некоторые из них имеют очень высокую эффективность. Если инвертор будет часто находиться без нагрузки, то необходимо выбирать такой, который имеет низкое потребление в ждущем режиме. Если же он будет большую часть времени питать нагрузку, то необходимо выбирать инвертор с максимальным КПД.

Солнечные панели вырабатывают постоянный ток, и АБ хранят энергию в виде постоянного тока, но большинство приборов и потребителей энергии требуют переменный ток напряжением 220 В или 380 В. Инвертор преобразует низкое напряжение 12, 24, 32, 36, 48, 96, 120 В постоянного тока в высокое напряжение 220 В переменного тока. Часть энергии неизбежно теряется при преобразовании – от 5% до 20%, в зависимости от качества инвертора и режима его работы [7,8].

Инверторы бывают различной мощности, а их тип выбирается в зависимости от применения. Маломощные инверторы (100–1000 Вт) обычно используются в малых автономных системах для питания, например, лампочек, телевизора, радио и других приборов. Они бывают на входное напряжение 12 В или 24 В и выходное 220 В. Более мощные инверторы имеют входное напряжение 24 В или 48 В (а иногда 96 В и выше).

Дешевые инверторы генерируют ступенчатую или прямоугольную форму напряжения – так называемую квазисинусоидальную или модифицированную синусоиду. Такая форма напряжения не всегда подходит к приборам. Инверторы с синусоидальной формой напряжения обеспечивают качество энергии такое же, как в сети, и могут питать без проблем любую нагрузку переменного тока.

Функции современных инверторов [7]

- Измерение. На дисплее инвертора отображаются напряжение и ток, частота и мощность.
- Возможность автозапуска генератора. В инверторе имеются дополнительные реле для автоматического запуска и останова резервного генератора в зависимости от напряжения на батарее. Часто эта функция представлена в виде опции, как отдельный блок к инвертору. Современные инверторы могут заряжать АБ от сети только в определенное время или запускать генератор только в дневное время (из-за шума).
- Работа параллельно с сетью. Сетевые инверторы напрямую поставляют энергию от солнечных батарей в сеть без АБ. Это существенно уменьшает стоимость системы, а значит, и удешевляет электроэнергию.
- Встроенное зарядное устройство. Такие инверторы для заряда АБ могут использовать энергию от сети или генератора. Одновременно они могут транслировать энергию от этих источников напрямую в нагрузку. Современные инверторы могут задавать или динамически менять зарядный ток во избежание перегрузки генератора.
- Параллельное соединение. Некоторые инверторы могут быть соединены параллельно для увеличения мощности.

1.13. Ориентация солнечных панелей

Солнечный свет проходит путь от Солнца до Земли по прямой линии. Когда он достигает атмосферы, часть света преломляется, часть достигает Земли по прямой линии, а другая часть поглощается атмосферой. Преломленный свет – это то, что обычно называется диффузной радиацией или рассеянным светом. Та часть солнечного света, которая достигает поверхности Земли без рас-

сеяния или поглощения, – это прямая радиация. Она наиболее интенсивная.

Солнечные панели производят электричество и в отсутствие прямого солнечного света. Поэтому даже при облачной погоде фотоэлектрическая система будет производить электричество. Однако наилучшие условия для генерации электроэнергии будут при ярком солнце и при ориентации панелей перпендикулярно солнечному свету. Для северного полушария панели должны быть ориентированы на юг, для южного – на север (табл. 1.4) [3].

Таблица 1.4

Влияние различных световых условий на выработку солнечных панелей (в % от полной мощности)

Световые условия	% от полной мощности
Яркое солнце, панели расположены перпендикулярно солнечным лучам	100
Легкая облачность	60–80
Пасмурная погода	20–30
За оконным стеклом, один слой, стекло и панель перпендикулярны солнечным лучам	91
За оконным стеклом, два слоя, стекло и панель перпендикулярны солнечным лучам	84
За оконным стеклом, один слой, стекло и панель под углом 45° солнечным лучам	64
Искусственный свет в офисе, на поверхности письменного стола	0,4
Искусственный свет внутри яркого помещения (например, магазин)	1,3
Искусственный свет внутри жилого помещения	0,2

Солнце движется по небу с Востока на Запад. Положение Солнца на небосклоне определяется двумя координатами – скло-

нением и азимутом (рис. 1.25). Склонение – это угол между линией, соединяющей наблюдателя и Солнце, и горизонтальной поверхностью. Азимут – это угол между направлением на Солнце и направлением на юг.

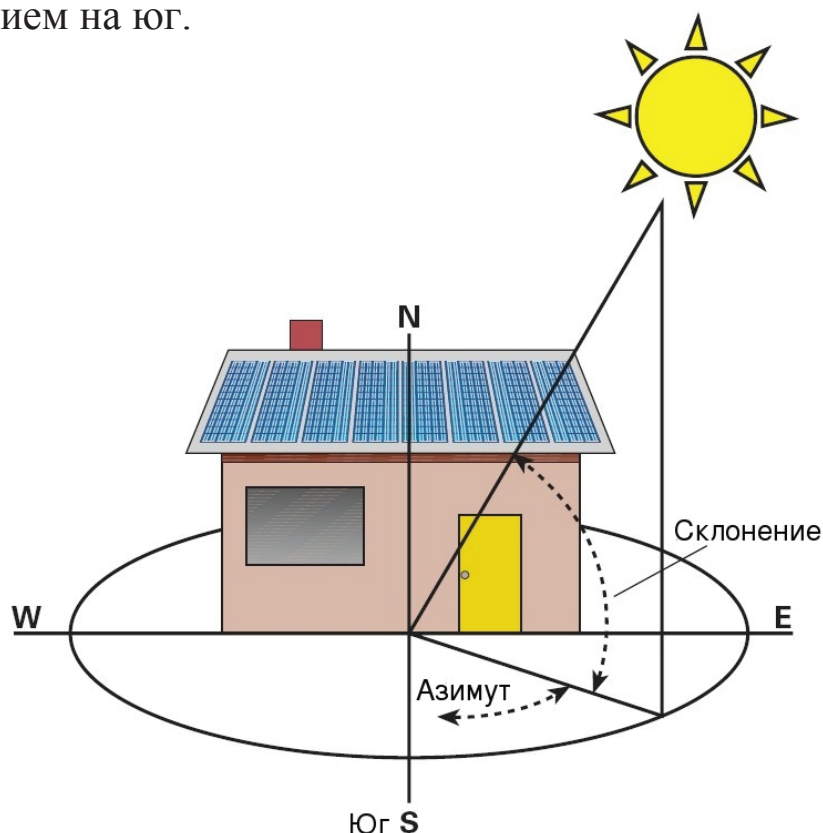


Рис. 1.25. Координаты, определяющие положение Солнца на небосклоне

На практике солнечные панели должны быть ориентированы под определенным углом к горизонтальной поверхности. Небольшие отклонения от этой ориентации не играют существенной роли, потому что в течение дня Солнце движется по небу с Востока на Запад. Например, доля выработки энергии фотоэлектрической системой при наклоне 45° для широты местности 52° северной широты: на запад – 78%; на юго-запад – 94%; на юг – 97%; на юго-восток – 94%; на восток – 78%.

Солнечные панели обычно располагаются на крыше или поддерживающей конструкции в фиксированном положении и не могут следить за положением Солнца в течение дня. Поэтому они не находятся под оптимальным углом (90°) в течение всего дня.

Угол между горизонтальной плоскостью и солнечной панелью называют углом наклона.

Вследствие движения Земли вокруг Солнца имеют место также сезонные вариации угла наклона. Зимой Солнце не достигает того же угла, что и летом. В идеале солнечные панели должны располагаться летом более горизонтально, чем зимой. Поэтому угол наклона для работы летом выбирается меньше, чем для работы зимой. Если нет возможности менять угол наклона дважды в год, то панели должны располагаться под оптимальным углом, значение которого лежит где-то посередине между оптимальными углами для лета и зимы. Для каждой широты есть свой оптимальный угол наклона панелей. Только около экватора солнечные панели должны располагаться горизонтально.

Для весны и осени оптимальный угол наклона солнечных панелей принимается равным значению широты местности, для зимы – к этому значению прибавляется 10–15 градусов, а летом – от этого значения отнимается 10–15 градусов. Небольшие отклонения до 5 градусов от этого оптимума оказывают незначительный эффект на производительность панелей. Различие в погодных условиях в большей степени влияет на выработку электричества.

Для автономных систем оптимальный угол наклона солнечных панелей зависит от месячного графика нагрузки: если в данном месяце потребляется больше энергии, то угол наклона нужно выбирать оптимальным именно для этого месяца. Также нужно учитывать, какое есть затенение в течение дня. Например, если с восточной стороны стоит дерево, а с западной все чисто, то имеет смысл сместить ориентацию с точного юга на юго-запад.

1.14. Выбор солнечных панелей для системы солнечного электроснабжения

При выборе солнечных панелей для системы солнечного электроснабжения следует обращать внимание на следующие технические характеристики [7,8].

1) Толеранс – это отклонение реальной мощности солнечной панели от ее номинального значения. Он может быть как положительным, так и отрицательным. Негативный толеранс не должен превышать 3%. Хорошо, если толеранс положителен, тогда не придется переплачивать за несуществующие Ватты. Более того, если панель с негативным толерансом будет соединена в цепочку с другими панелями, то неважно, насколько хороши будут остальные панели – вся цепочка будет работать как несколько панелей с мощностью, равной мощности самой плохой панели.

Например, если в цепочке из 10 солнечных панелей по 250 Вт одна будет иметь мощность на 3% меньше, чем 250 Вт, то вся цепочка выдаст вместо 2500 Вт всего лишь 2420 Вт. Таким образом одна плохая панель с мощностью всего на 6 Вт меньше номинальной приведет к потере 80 Вт или более (если даже другие панели будут иметь положительный толеранс).

Иногда можно слышать от продавцов, что их панели имеют большую мощность, потому что их КПД выше, чем у других панелей. Однако разница в КПД современных солнечных панелей редко превышает 1–2%. Если отрицательный толеранс «высокоэффективных панелей» будет 3–5%, то никакого выигрыша от более дорогих высокоэффективных панелей получить не удастся.

2) Температурный коэффициент. Отражает влияние повышения или понижения температуры панели на её выходные ток и напряжение. Как известно, напряжение и мощность панели при повышении температуры уменьшаются, а ток повышается. Чем

меньше температурный коэффициент изменения мощности, тем лучше.

3) Эффективность преобразования солнечного света. Чем больше КПД, тем меньшая площадь панелей потребуется для генерации одинаковой мощности и энергии.

На самом деле, не так важно, какой КПД имеет выбранная солнечная панель. От этого параметра зависит только площадь, занимаемая солнечной батареей. Если нет жестких ограничений по месту установки солнечных панелей, то можно даже не обращать внимания на этот параметр. Разница в КПД обычных и «высокоэффективных панелей» может составлять единицы процентов; на те же единицы процентов уменьшится площадь, занимаемая «высокоэффективными» солнечными батареями. Если говорить об эффективности, то нужно оценивать её и КПД полной солнечной энергосистемы, учитывая РТС, толеранс, КПД инвертора, потери в проводах и коммутации и другие факторы.

4) Размеры и мощность. Стоимость панели прямо пропорционально зависит от ее мощности. Однако, чем больше единичная мощность панели, тем меньше будет стоимость 1 Ватта. Поэтому, если нужна определенная мощность, то лучше ее набрать большими панелями, чем маленькими – это будет и дешевле, и надежнее из-за малого числа соединений.

5) Параметры при РТС. РТС – это независимые испытания сертификационных лабораторий в США, которые призваны определять эффективность работы панели в реальных (а не идеальных, как указано на шильдике панели) условиях эксплуатации. Эти параметры очень важны.

Отношение РТС/STC должно быть не менее 89–90%. Чем оно выше, тем лучше будет работать солнечная панель в реальных условиях эксплуатации.

б) Эффективность солнечных инверторов и контроллеров.

При выборе солнечных панелей нельзя обращать внимание только на их КПД, и не обращать внимание на КПД других элементов системы, особенно контроллеров и инверторов. Минимальный уровень КПД контроллеров и инверторов должен быть 95%.

Сейчас на рынке продается много дешевых батарейных и сетевых фотоэлектрических инверторов с КПД 85% и менее. Но большинство производителей дают данные по КПД в точке, где он максимальный, и в среднем инвертор работает с КПД ниже указанного. Это означает, что 15–20% от общей мощности панелей будут работать только на инвертор. Низкий КПД инвертора не так страшен, если есть возможность получать электроэнергию от сети, но если она генерируется дорогими солнечными батареями, такие потери недопустимы.

2. ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД «SOLAR LAB».



ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Лабораторный стенд «Solar Lab» предназначен для проведения лабораторных работ и практических занятий. Он позволяет определить основные характеристики солнечных элементов: напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, вольт-амперную характеристику (ВАХ) и рабочие параметры при различных ориентациях элементов и интенсивностях источника света.

Лабораторный стенд «Solar Lab» состоит из стендов «Внешний» и «Внутренний» (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Технические характеристики стендов «Внешний» и «Внутренний»

«Внешний»		
Количество осей вращения	2	
Диапазон вращения:		
• по вертикальной оси	160°	
• по горизонтальной оси	180°	
Точность позиционирования:		
• по вертикальной оси	$\pm 2^{\circ}$	
• по горизонтальной оси	$\pm 2^{\circ}$	
Точность измерения напряжения	± 2 мВ	
Точность измерения тока	± 5 мА	
«Внутренний»		
Напряжения питания	220 – 240 В	
Потребляемая мощность	60 Вт	
Количество осей вращения	1	
Диапазон вращения по горизонтальной оси	90°	
Точность позиционирования	$\pm 2^{\circ}$	
Точность измерения напряжения	± 2 мВ	
Точность измерения тока	± 5 мА	

Лабораторный стенд «Solar Lab» работает совместно с контрольно-измерительным оборудованием на основании платформы NI PXI под руководством программного обеспечения, написанного на графическом языке программирования LabView.

Стенд «Внешний» может использоваться для проведения лабораторных работ в реальных условиях с использованием Солнца в качестве источника энергии. Лабораторные работы со стендом «Внутренний» проводятся в помещении, в качестве источника энергии используется встроенная в стенд лампа накаливания.

3. ТРЕБОВАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

При эксплуатации лабораторного стенда «Solar Lab» необходимо соблюдать требования «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей» [10].

Лабораторный стенд имеет низковольтное питание. Запрещается разбирать сетевой блок питания устройств стенда, подключать прочие блоки питания, не входящие в комплект стенда, или производить какие-либо иные внешние подключения.

Блоки питания всех устройств должны подключаться к сетевой розетке, имеющей шину заземления.

Запрещается включение лабораторного стенда в сеть в присутствии легковоспламеняющихся жидкостей или если в воздухе содержатся горючие газы. Техническое обслуживание лабораторного стенда должно производиться только квалифицированным персоналом.

При неисправностях, появлении запаха, свидетельствующего о возгорании электрических проводов или радиокомпонентов, следует незамедлительно прекратить работу, выключить стенд из сети и обратиться за помощью к обслуживающему персоналу.

Меры предосторожности:

- 1) не допускайте никакого механического воздействия на приборы,
- 2) не перемещайте приборы во время работы,
- 3) соблюдайте стандартные правила безопасности пользования бытовой электросетью,
- 4) не перекрывайте вентиляционное отверстие на стенде «Внутренний»,
- 5) при включенном стенде «Внутренний», во избежание ожогов, не прикасайтесь к источнику света,

6) при включенных стендах не допускайте соприкосновения движущихся узлов приборов с посторонними предметами или частями тела,

7) не допускайте попадания влаги в приборы,

8) не подвергайте стенд «Внешний» воздействию атмосферных осадков.

4. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ С ЛАБОРАТОРНЫМ СТЕНДОМ «SOLAR LAB»

4.1. Стенд «Внешний»

- Установите стенд на жесткую ровную поверхность. При помощи компаса сориентируйте его по сторонам света в соответствии со стрелкой. Необходимо обеспечить горизонтальное положение стенда, основываясь на показаниях индикатора уровня, закрепленного на основании стенда (в горизонтальном положении стенда пузырек индикатора уровня должен быть в центре) (рис. 4.1).

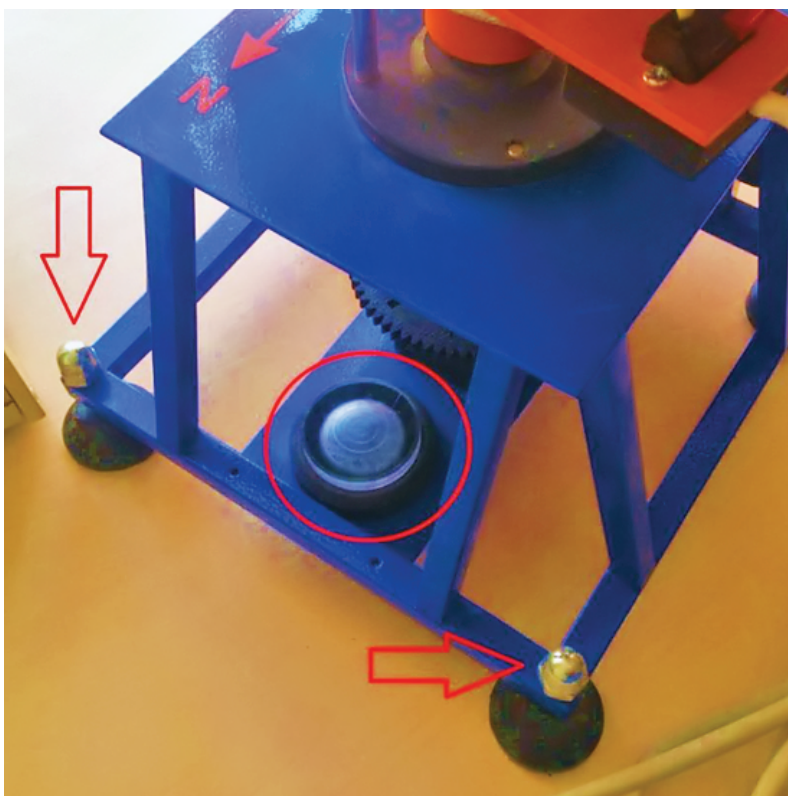


Рис. 4.1. Подготовка стенда «Внешний» к работе

- Выберите один из солнечных элементов и установите на стенд (рис. 4.2); все его выступы при этом должны попасть в углубления на пластине стенда. Элемент удерживается при помощи магнитов.

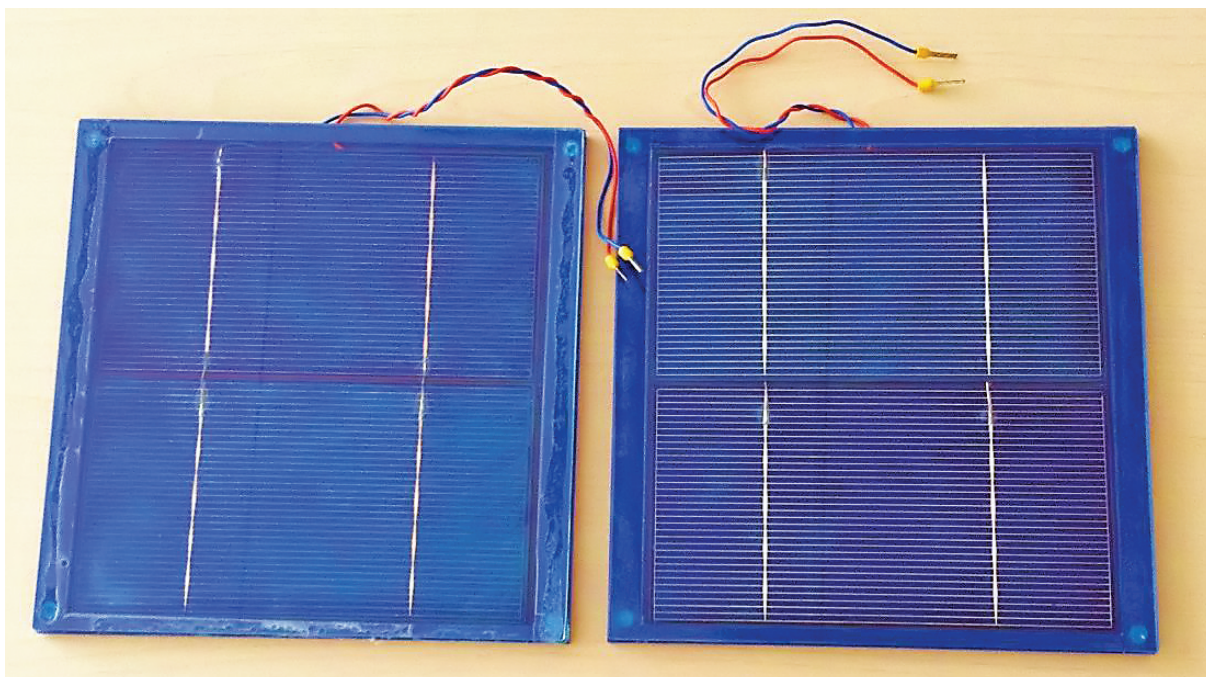


Рис. 4.2. Солнечные элементы для стенда «Внешний»

Подключите солнечный элемент, соблюдая полярность: плюсовой вывод солнечного элемента подключается к плюсовому зажиму разъёма (красный), минусовой вывод – к минусовому зажиму (синий) (рис. 4.3).

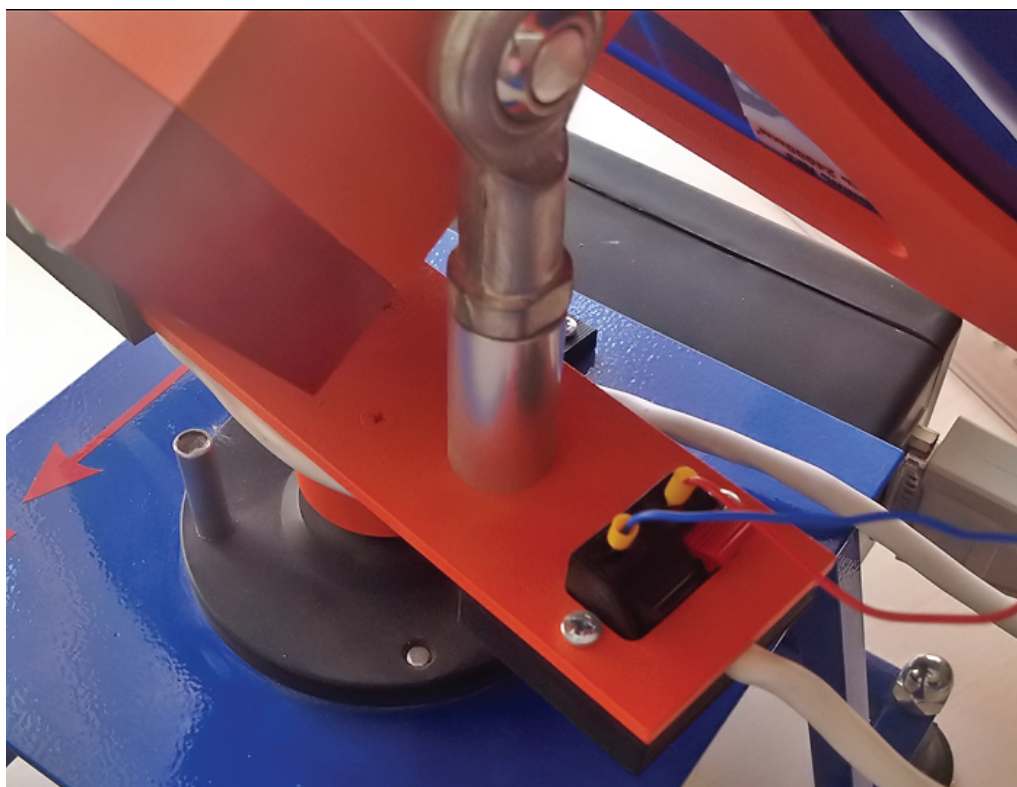


Рис. 4.3. Подключение элемента в строгом соблюдении полярности

- Подсоедините сетевой кабель к корпусу стенда (рис. 4.4).

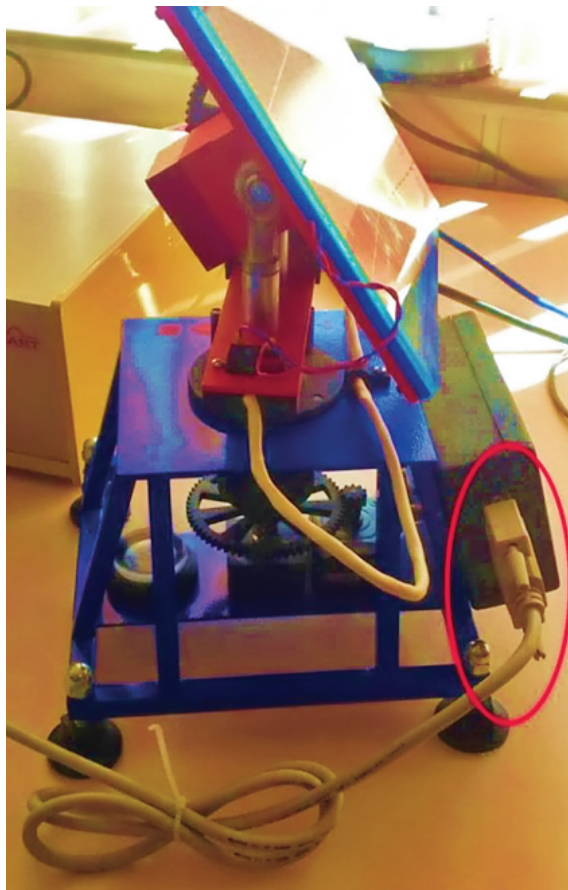


Рис. 4.4. Подключение сетевого кабеля к стенду «Внешний»

- На рабочем столе компьютера запустите программу «SolarLab» и перейдите на вкладку «Внешний» (рис. 4.5).

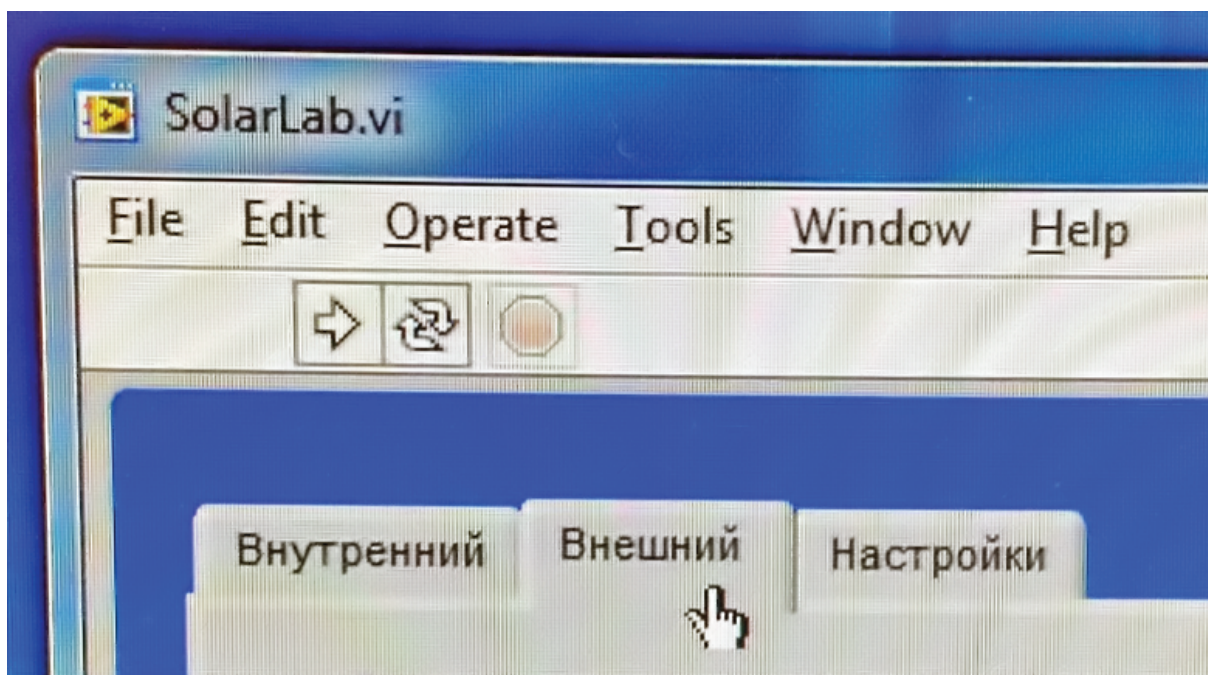


Рис. 4.5. Выбор стенда «Внешний»

• На рисунке 4.6 показан интерфейс вкладки «Внешний», который содержит следующие элементы управления:

1 – ручка установки азимутального угла (шкала ручки автоматически меняется в зависимости от положения Солнца).

2 – ручка установки угла склонения.

3, 4 – терминалы установки географических координат местоположения стенда (широта, долгота).

5 – кнопка включения автоматического слежения за положением Солнца.

6 – индикатор текущего угла склонения Солнца.

7 – индикатор текущего азимутального угла Солнца.

8 – кнопка запуска автоматического сканирования характеристики солнечного элемента.

9 – индикатор текущего напряжения солнечного элемента.

10 – индикатор текущего тока нагрузки солнечного элемента.

11 – индикатор текущей мощности солнечного элемента.

12 – график вольт-амперной характеристики испытуемого солнечного элемента.

13 – ручка установки электронной нагрузки.

14 – кнопка остановки программы.

В окна терминалов 3 и 4 вводятся географические координаты местоположения стенда (широта, долгота).

Ручками 1 и 2 задается необходимый вектор направленности для солнечного элемента. Диапазон возможных значений терминалов 1 и 2 автоматически изменяется в соответствии с текущим положением Солнца, которое отображается в индикаторах 6 и 7. При включенной кнопке 5 программа автоматически ориентирует элемент на Солнце. В этом случае ручки 1 и 2 недоступны пользователю. С помощью индикатора 9 можно контролировать текущее напряжение солнечного элемента.

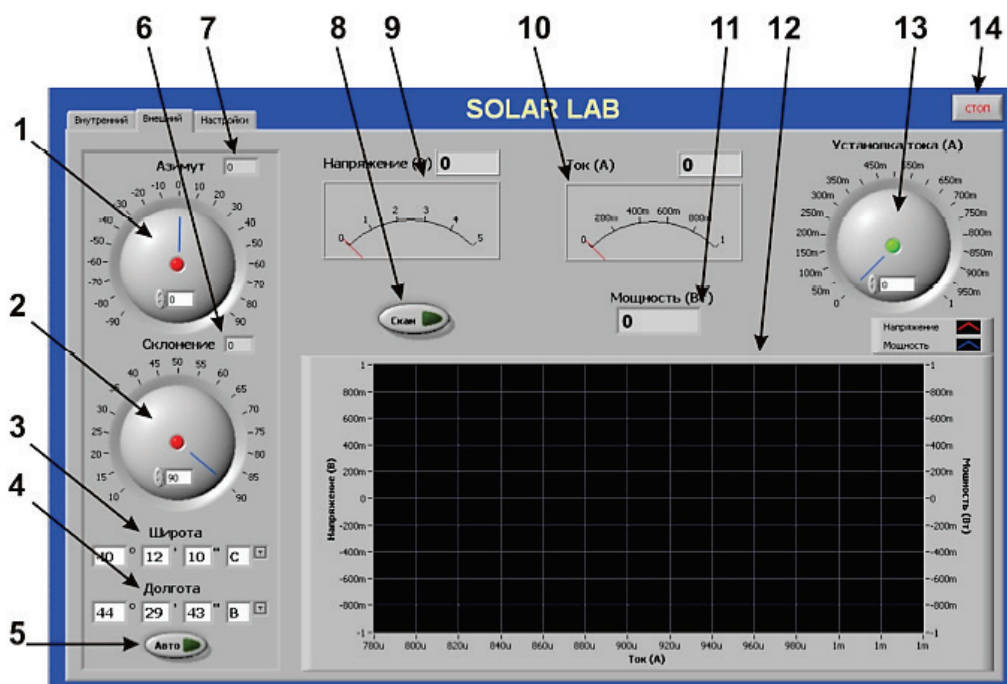


Рис. 4.6. Вкладка «Внешний»

Поворотом ручки 13 задается необходимый ток нагрузки. При установке нагрузки больше, чем может в данный момент обеспечить тестируемый солнечный элемент, программа автоматически снизит нагрузку. Фактическое значение тока можно контролировать индикатором 10. Индикатор 11 показывает текущее значение мощности, вырабатываемой солнечным элементом. Для получения вольт-амперной характеристики (ВАХ) испытуемого элемента нужно нажать на кнопку запуска автоматического сканирования характеристики солнечного элемента 8. Программа в автоматическом режиме получит вольт-амперную характеристику и график зависимости вырабатываемой мощности от приложенной нагрузки.

Примечание. Во избежание некорректных результатов во время сканирования старайтесь, чтобы интенсивность излучения в процессе работы не изменялась.

- Чтобы начать работу, нужно нажать на кнопку «Run» во вкладке «Operate» программы (рис. 4.7).

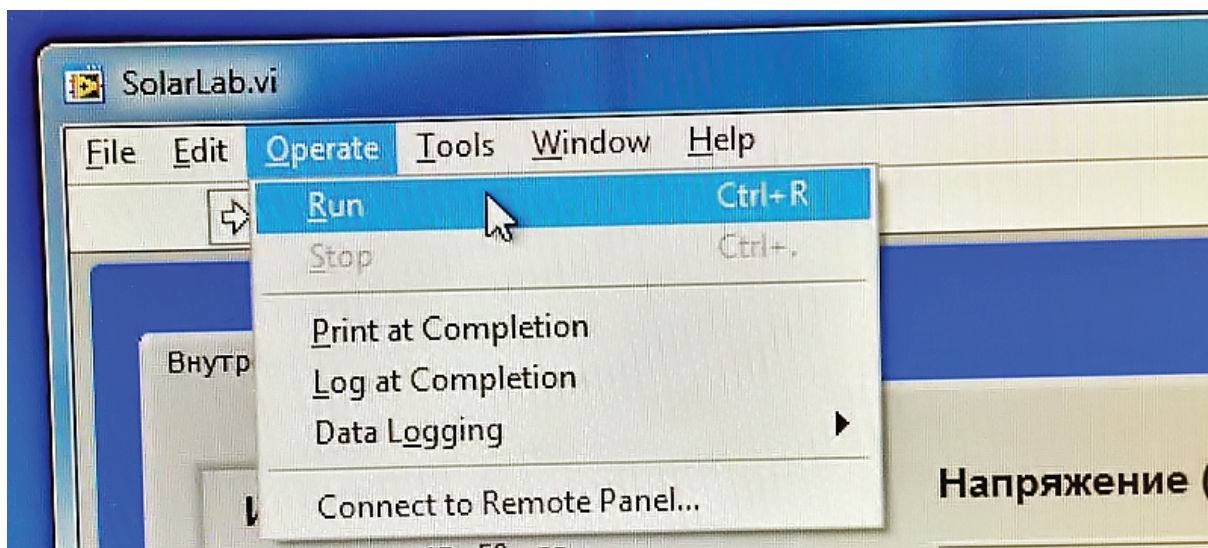


Рис. 4.7. Запуск стенда «Внешний»

- При завершении работы со стендом «Внешний» нажмите на кнопку «Стоп», закройте программу «SolarLab», отсоедините сетевой кабель.

4.2. Стенд «Внутренний»

- Установите стенд на жесткую ровную поверхность. Не допускайте перекрытия вентиляционного отверстия на задней панели стенда. Откройте крышку стенда.

- Выберите один из солнечных элементов и установите на стенд (рис. 4.8), его выступы должны попасть в углубления на пластине стенда. Элемент удерживается при помощи магнитов.

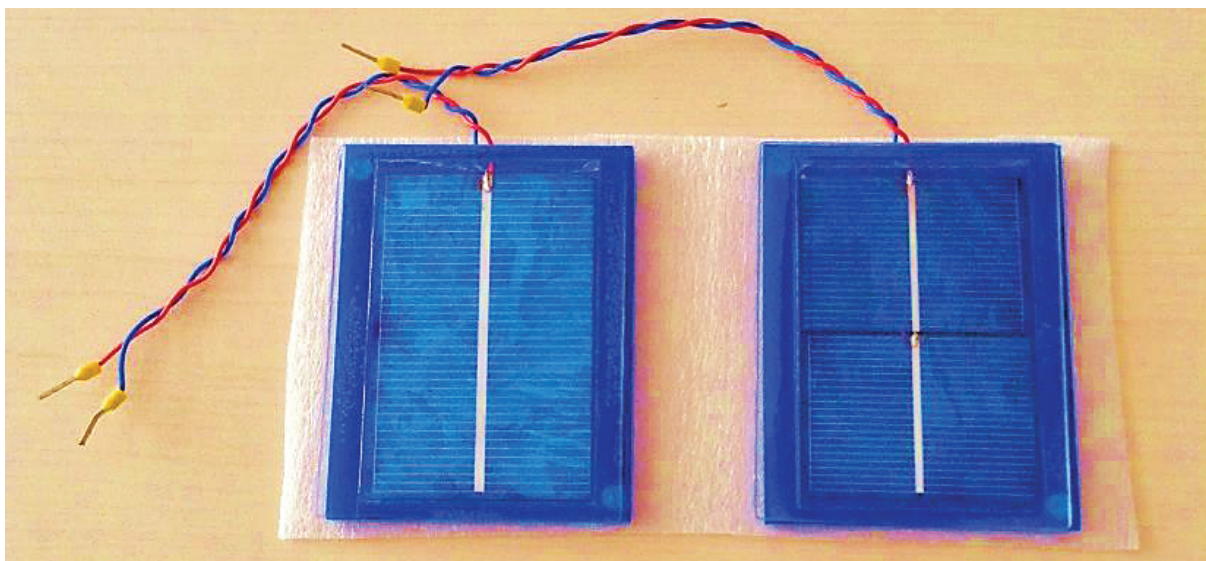


Рис. 4.8. Солнечные элементы для стенда «Внутренний»

Подключите солнечный элемент, соблюдая полярность: плюсовой вывод солнечного элемента подключается к плюсовому зажиму разъёма (красный), минусовой вывод – к минусовому зажиму (синий) (рис. 4.9).

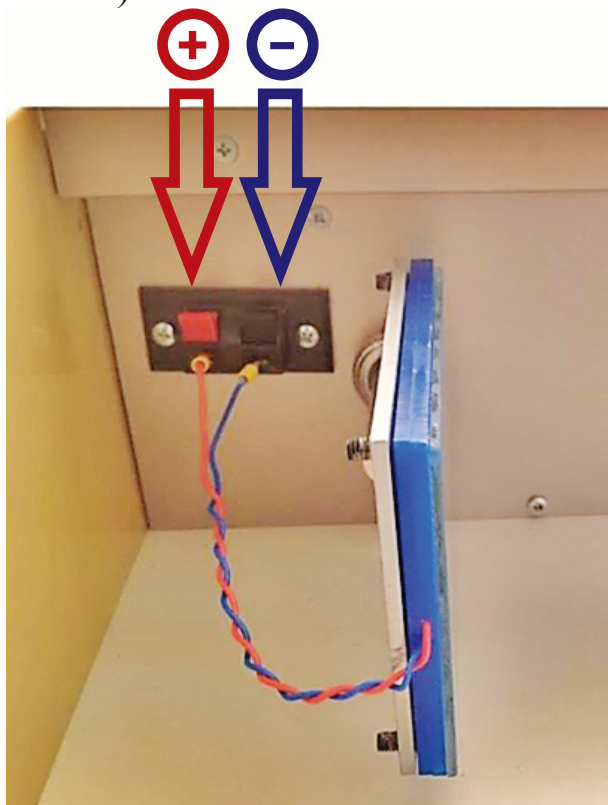


Рис. 4.9. Подключение элемента в строгом соблюдении полярности

- Включите выключатель и подсоедините кабель на задней стороне панели стенда (рис. 4.10).



Рис. 4.10. Узлы и детали стенда «Внутренний»

- На рабочем столе компьютера запустите программу «SolarLab» и перейдите на вкладку «Внутренний» (рис. 4.11).

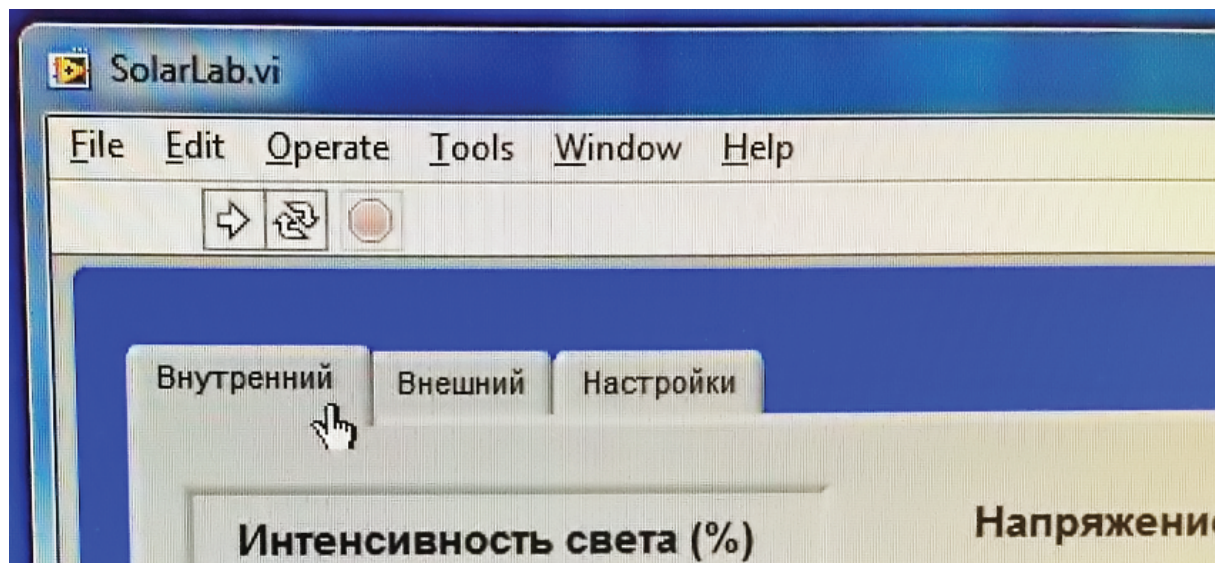


Рис. 4.11. Выбор стенда «Внутренний»

- На рисунке 4.12 показан интерфейс вкладки «Внутренний», который содержит следующие элементы управления:

- 1 – ручка установки мощности источника света.
- 2 – ручка установки угла положения солнечного элемента.
- 3 – кнопка запуска автоматического сканирования характеристики солнечного элемента.
- 4 – индикатор текущего напряжения солнечного элемента.
- 5 – индикатор текущего тока нагрузки солнечного элемента.
- 6 – индикатор текущей мощности солнечного элемента.
- 7 – график вольт-амперной характеристики (ВАХ) испытуемого солнечного элемента.
- 8 – ручка установки электронной нагрузки.
- 9 – кнопка остановки программы.

Ручкой 1 устанавливается необходимая интенсивность источника света, а ручкой 2 – необходимый угол положения солнечного элемента относительно источника света. Индикатор 4 показывает текущее напряжение солнечного элемента.

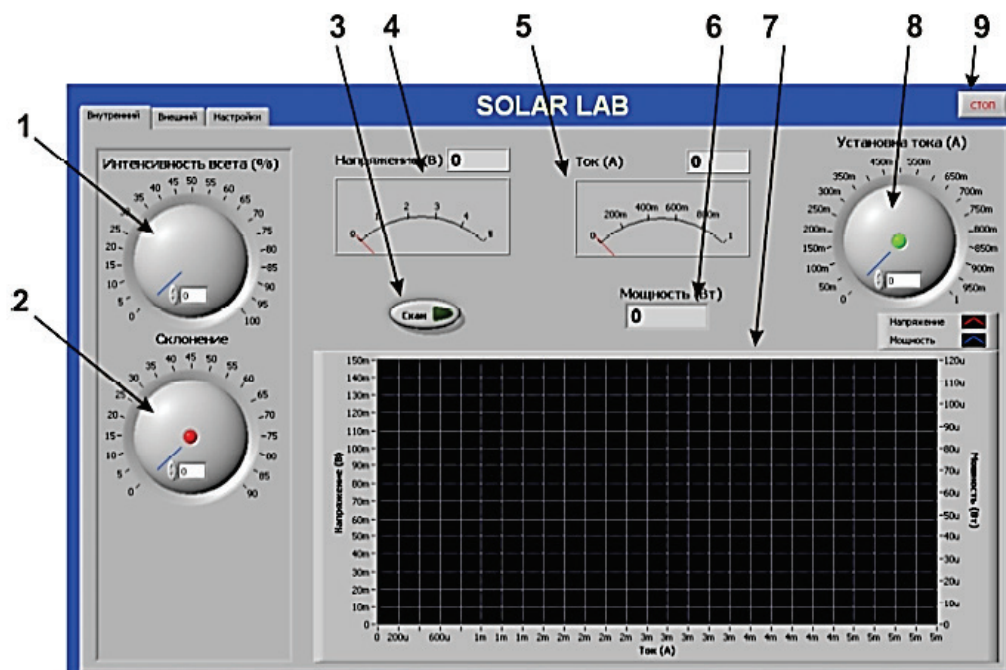


Рис. 4.12. Вкладка «Внутренний»

Поворотом ручки 8 можно задавать необходимый ток нагрузки. При установке нагрузки больше, чем может в данный момент обеспечить тестируемый солнечный элемент, программа автоматически снизит нагрузку. Фактическое значение тока контролируется индикатором 5. Индикатор 6 показывает текущее значение мощности, вырабатываемой солнечным элементом. Для получения вольт-амперной характеристики испытуемого солнечного элемента нужно нажать кнопку 3 для запуска автоматического сканирования характеристики солнечного элемента. Программа в автоматическом режиме получит вольт-амперную характеристику, а также график зависимости вырабатываемой мощности от приложенной нагрузки.

Внимание. Во избежание ожогов недопустимо прикасаться к источнику света при включенном стенде.

- Чтобы начать работу, нужно нажать на кнопку «Run» во вкладке «Operate» программы (рис. 4.13). При этом крышка стенда должна быть закрыта.

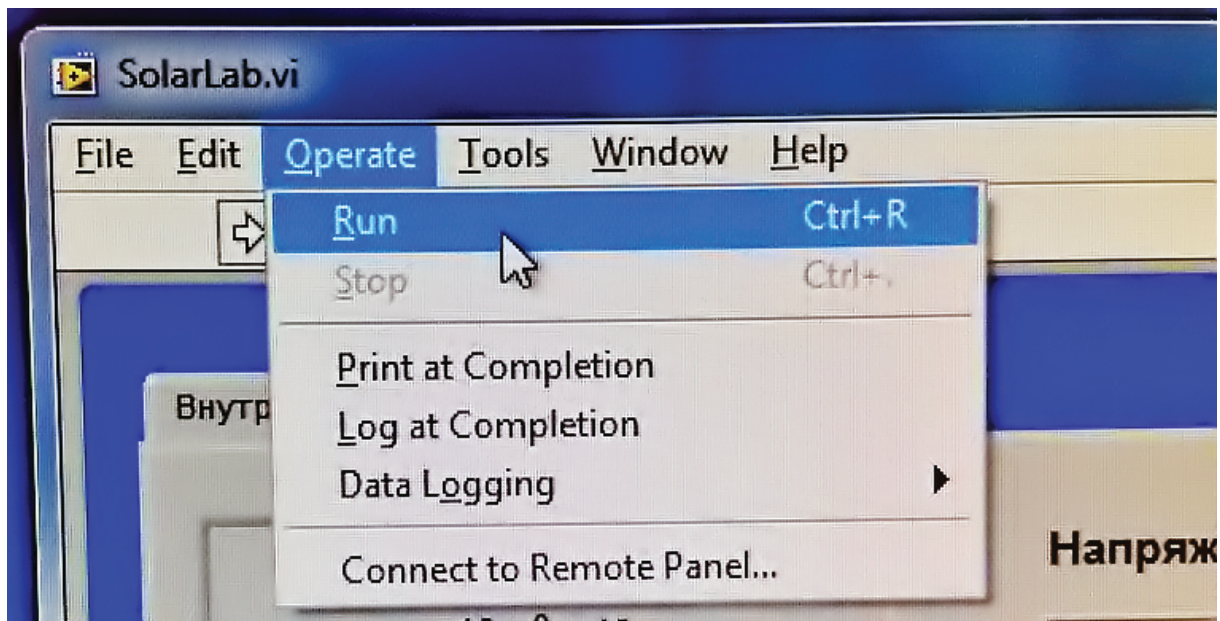


Рис. 4.13. Запуск стенда «Внутренний»

- При завершении работы со стендом «Внутренний» нажмите на кнопку «Стоп», закройте программу «SolarLab», выключите выключатель на задней панели, отсоедините сетевой кабель.

5. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

5.1. Лабораторная работа № 1

Напряжение холостого хода солнечных элементов

Цель работы. Определение зависимости напряжения холостого хода солнечных элементов от угла наклона элемента и интенсивности источника света.

Перед выполнением лабораторной работы внимательно изучите рубрику 1 «Физико-технические основы фотоэлектрической солнечной энергетики».

Одной из основных характеристик солнечных элементов является напряжение холостого хода, генерируемое одним элементом. Напряжение холостого хода – это максимальное напряжение, создаваемое солнечным элементом, возникающее при нулевом токе. Оно равно прямому смещению, соответствующему изменению напряжения p – n -перехода при появлении светового тока. Напряжение холостого хода отдельного элемента может меняться при переходе от одного элемента к другому даже в одной партии одной и той же фирмы-производителя и составлять около 0,5 В. Поэтому при сборке солнечных панелей надо подбирать элементы с близкими значениями напряжения холостого хода. В противном случае итоговое КПД будет меньше максимально-расчетного.

Для проведения лабораторной работы вам необходимы:

- 1) стенд «Внутренний»,
- 2) солнечные элементы из комплекта стенда,
- 3) аппаратура NI (PXI - 1042Q, PXI - 8110, PXI - 6251 - M-DAQ, PXI - 4130, SCB-68).

Внимание. Перед проведением работ внимательно ознакомь-

тесь с инструкциями по технике безопасности и эксплуатации (рубрики 3 и 4).

5.1.1. Последовательность выполнения лабораторной работы

1. Подключите стенд «Внутренний» согласно пункту 4.2.

2. Убедитесь, что ручка регулятора электронной нагрузки «Установка тока» установлена на 0.

3. Установите ручку регулятора угла положения солнечного элемента «Склонение» на 0.

4. Чтобы начать работу, нужно нажать на кнопку «Run» во вкладке «Operate» программы. При этом крышка стенда «Внутренний» должна быть закрыта.

5. Меняя значение ручки регулятора мощности источника света «Интенсивность света» по показаниям вольтметра «Напряжение» заполните табл. 5.1 для первого исследуемого элемента (рис. 5.1). Измерять напряжение холостого хода необходимо 3 раза для каждого исследуемого солнечного элемента.

6. Установите ручку регулятора мощности источника света «Интенсивность света» на 100%.

7. Меняя значение ручки регулятора угла положения солнечного элемента «Склонение», по показаниям вольтметра «Напряжение» заполните табл. 5.2 для первого исследуемого солнечного элемента (рис. 5.2). Измерять напряжение холостого хода необходимо 3 раза для каждого исследуемого солнечного элемента.

8. Остановите программу «SolarLab». Выключите выключатель на задней панели стенда. Поменяйте солнечный элемент. Включите выключатель на задней панели стенда.

9. Повторите пункты 4–7, заполняя таблицы 5.1 и 5.2 для второго элемента. Измерять напряжение холостого хода необходимо 3 раза для каждого исследуемого солнечного элемента.

10. Остановите и закройте программу «SolarLab». Выключите выключатель на задней панели.

Таблица 5.1

Значения напряжения холостого хода при изменении интенсивности источника света

Элемент	Опыт	Мощность источника света							
		30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
№1 Напряжение холостого хода, мВ	№1								
	№2								
	№3								
	Средние значения								
№2 Напряжение холостого хода, мВ	№1								
	№ 2								
	№3								
	Средние значения								

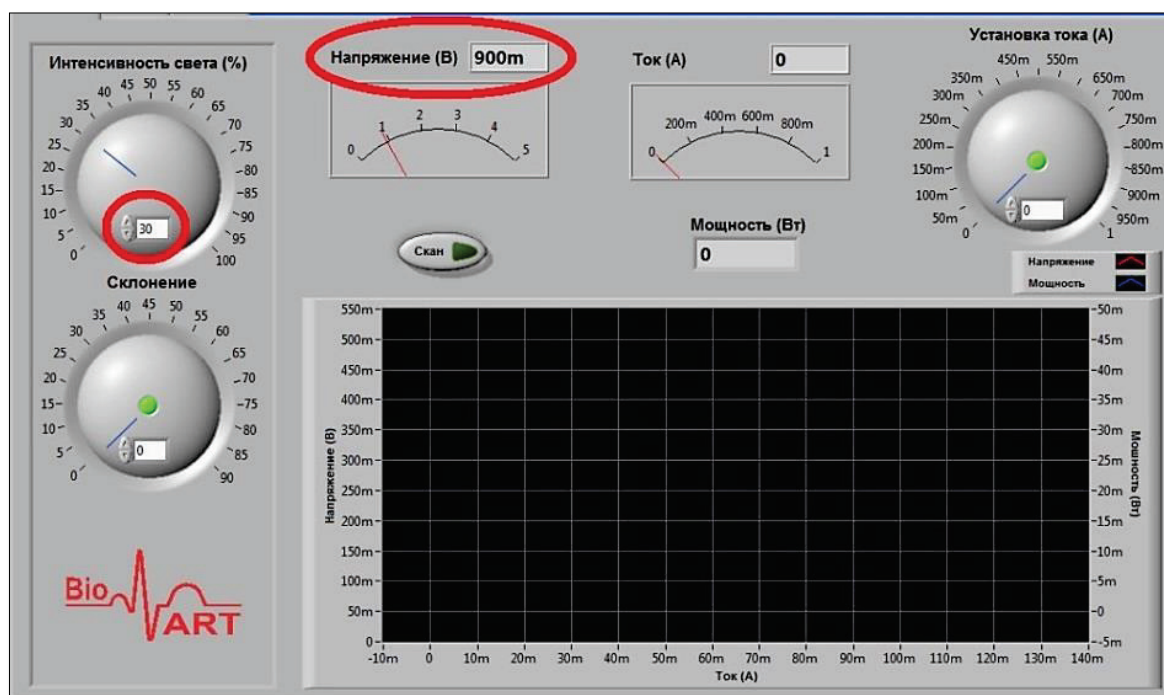


Рис. 5.1. Изменение значения ручки регулятора «Интенсивность света»

Таблица 5.2

Значения напряжения холостого хода при изменении угла положения солнечных элементов

Элемент	Опыт	Угол положения солнечного элемента (при интенсивности света 100%)									
		0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
№1 Напряжение холостого хода, мВ	№1										
	№2										
	№3										
	Средние значения										
№2 Напряжение холостого хода, мВ	№1										
	№ 2										
	№3										
	Средние значения										

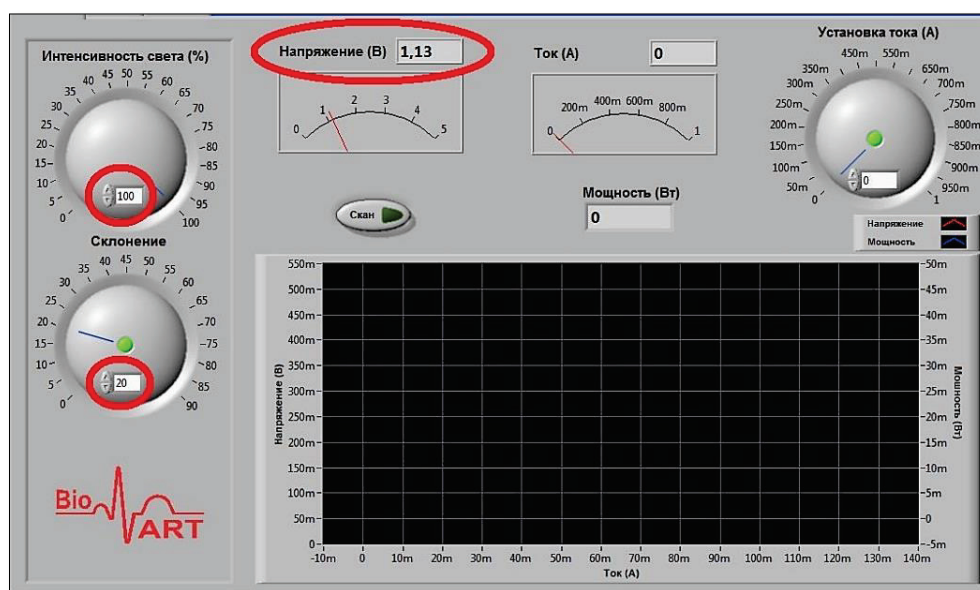


Рис. 5.2. Изменение значения ручки регулятора «Склонение»

11. Подготовьте отчет по выполненной лабораторной работе в формате Word/pdf с анализом полученных экспериментальных данных и соответствующими графиками.

12. Готовый отчет отправьте на электронный адрес преподавателя, имя файла должно иметь следующую структуру: **1С_Фамилия1_Фамилия2.doc (или .pdf).**

5.1.2. Задание для подготовки отчета по лабораторной работе

- Полученные экспериментальные данные должны быть записаны в таблицы 5.1 и 5.2 и представлены в отчете.

- При обработке экспериментальных данных используются среднеарифметические значения напряжения холостого хода солнечного элемента.

- Используя полученные среднеарифметические значения, в программе MS Excel необходимо построить график зависимости напряжения холостого хода от мощности источника света (тип диаграммы «Точечная»), совместив на нем данные двух исследуемых солнечных элементов.

- Для моделирования исследуемого процесса добавьте в диаграмму линию тренда с высоким значением величины R^2 (чем ближе значение R^2 к единице, тем надежнее линия тренда аппроксимирует исследуемый процесс).

- Используя полученные среднеарифметические значения, в программе MS Excel необходимо построить график зависимости напряжения холостого хода от угла положения солнечного элемента (тип диаграммы «Точечная»), совмещая на одном графике данные двух исследуемых солнечных элементов.

- Для моделирования исследуемого процесса добавьте в диаграмму линию тренда с высоким значением величины R^2 (чем ближе значение R^2 к единице, тем надежнее линия тренда аппроксимирует исследуемый процесс).

- Полученные графики должны быть представлены в отчете.

• Проанализируйте полученные графики, сделайте вывод и объясните, как меняется напряжение холостого хода при изменении интенсивности источника света и угла наклона солнечного элемента.

5.1.3. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте цель лабораторной работы и поясните, как достигается поставленная цель.

2. Назовите основные элементы лабораторного стенда и объясните их назначение.

3. Что такое иррадиация?

4. Что такое воздушная масса? Что характеризует данный показатель?

5. Чему равна средняя интенсивность солнечного излучения на Земле?

6. Ресурсы солнечной энергии в России.

7. Назовите три основных закона фотоэлектрического эффекта.

8. Теория фотоэлектрического эффекта.

9. Конструкция солнечного элемента.

10. Моно- и поликристаллические солнечные элементы. Основные технические характеристики.

11. Аморфные (тонкопленочные) солнечные элементы. Основные технические характеристики.

12. Что такое напряжение холостого хода солнечного элемента?

13. Что такое ток короткого замыкания солнечного элемента?

14. Что такое вольт-амперная характеристика (ВАХ) солнечного элемента?

15. Что такое точка максимальной мощности?

16. Что такое коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики солнечного элемента?

17. Как найти максимальную мощность, снимаемую с единицы площади солнечного элемента?

18. Как меняется напряжение холостого хода солнечного элемента при изменении интенсивности источника света? Объясните полученный результат.

19. Как меняется напряжение холостого хода при изменении угла наклона солнечного элемента? Объясните полученный результат.

5.2. Лабораторная работа №2

Ток короткого замыкания солнечных элементов

Цель работы. Определение зависимости тока короткого замыкания солнечных элементов от угла наклона элемента и интенсивности источника света.

Перед выполнением лабораторной работы внимательно изучите рубрику 1 «Физико-технические основы фотоэлектрической солнечной энергетики».

Ток короткого замыкания – это ток, протекающий через солнечный элемент, когда напряжение равно нулю (то есть когда солнечный элемент замкнут накоротко). Он возникает в результате генерации и разделения сгенерированных светом носителей. В идеальном солнечном элементе при умеренных резистивных потерях ток короткого замыкания равен световому. Поэтому первый можно считать максимальным током, который способен создать солнечный элемент. Ток короткого замыкания прямо пропорционально зависит от интенсивности света.

Для проведения лабораторной работы вам необходимы:

1) стенд «Внутренний»,

- 2) солнечные элементы из комплекта стенда,
- 3) аппаратура NI (PXI - 1042Q, PXI - 8110, PXI - 6251 - M-DAQ, PXI - 4130, SCB-68).

Внимание. Перед проведением работ внимательно ознакомьтесь с инструкциями по технике безопасности и эксплуатации (рубрики 3 и 4).

5.2.1. Последовательность выполнения лабораторной работы

1. Подключите стенд «Внутренний» согласно пункту 4.2.
2. Убедитесь, что ручка регулятора электронной нагрузки «Установка тока» установлена на 0.
3. Установите ручку регулятора угла положения солнечного элемента «Склонение» на 0.
4. Чтобы начать работу, нужно нажать на кнопку «Run» во вкладке «Operate» программы. При этом крышка стенда «Внутренний» должна быть закрыта.
5. Установите максимальный возможный ток для исследуемого солнечного элемента при данных условиях. Для этого ручкой регулятора «Установка тока» задайте максимальную нагрузку «1А». После этого программа автоматически уменьшит нагрузку до максимально возможной. По показаниям амперметра «Ток» получаем значение тока короткого замыкания при данных условиях.
6. Повторите пункт 5 при различных значениях регулятора электронной мощности источника света («Интенсивность света») и заполните табл. 5.3 для первого исследуемого солнечного элемента (рис. 5.3). Измерения тока короткого замыкания необходимо проводить 3 раза для каждого исследуемого солнечного элемента.

7. Установите ручку регулятора мощности источника света «Интенсивность света» на 100%.

Таблица 5.3

Значения тока короткого замыкания при изменении интенсивности источника света

Элемент	Опыт	Мощность источника света							
		30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
№1 Ток короткого замыкания, мА	№1								
	№2								
	№3								
	Средние значения								
№2 Ток короткого замыкания, мА	№1								
	№ 2								
	№3								
	Средние значения								

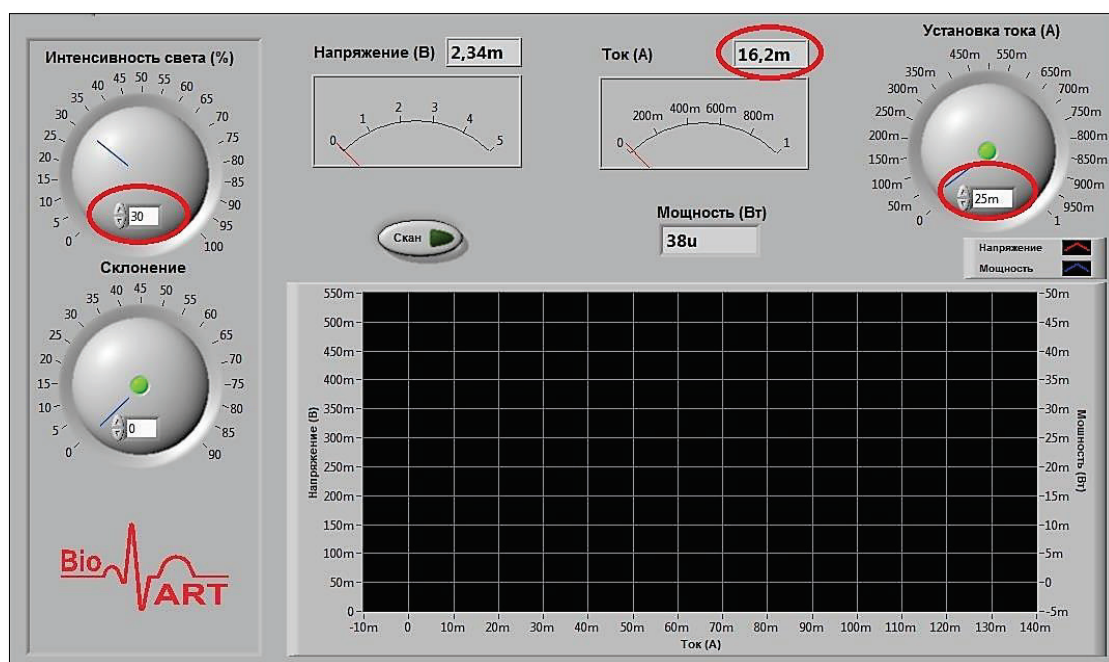


Рис. 5.3. Изменение значения ручки регулятора «Интенсивность света»

8. Повторите пункт 5 при различных значениях регулятора угла положения солнечного элемента «Склонение» и заполните табл. 5.4 для первого исследуемого элемента (рис. 5.4). Измерения тока короткого замыкания необходимо проводить 3 раза для каждого исследуемого солнечного элемента.

Таблица 5.4

Значения тока короткого замыкания при изменении угла положения солнечных элементов

Элемент	Опыт	Угол положения солнечного элемента (при интенсивности света 100%)									
		0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
№1 Ток короткого замыкания, мА	№1										
	№2										
	№3										
	Средние значения										
№2 Ток короткого замыкания, мА	№1										
	№ 2										
	№3										
	Средние значения										

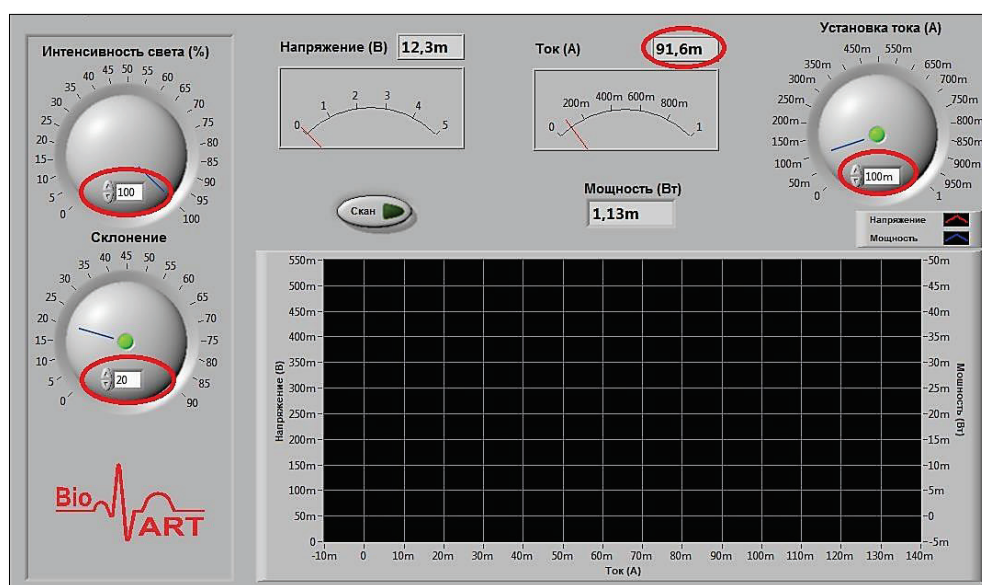


Рис. 5.4. Изменение значения ручки регулятора «Склонение»

9. Остановите программу «SolarLab». Выключите выключатель на задней панели стенда. Поменяйте солнечный элемент. Включите выключатель на задней панели стенда.

10. Повторите пункты 4–8 лабораторной работы, заполняя таблицы 5.3 и 5.4 для второго солнечного элемента. Измерять ток короткого замыкания необходимо 3 раза для каждого исследуемого солнечного элемента.

11. Остановите и закройте программу «SolarLab». Выключите выключатель на задней панели.

12. Подготовьте отчет по выполненной лабораторной работе в формате Word/pdf с анализом полученных экспериментальных данных и соответствующими графиками.

13. Готовый отчет отправьте на электронный адрес преподавателя, имя файла должно иметь следующую структуру: **2С_Фамилия1_Фамилия2.doc (или .pdf)**.

5.2.2. Задание для подготовки отчета по лабораторной работе

- Полученные экспериментальные данные должны быть записаны в таблицы 5.3 и 5.4 и представлены в отчете.
- При обработке полученных экспериментальных данных используются среднеарифметические значения тока короткого замыкания солнечного элемента.
- Используя полученные среднеарифметические значения, в программе MS Excel необходимо построить график зависимости тока короткого замыкания от мощности источника света (тип диаграммы «Точечная»), совместив на нем данные двух исследуемых солнечных элементов.
- Для моделирования исследуемого процесса добавьте в диаграмму линию тренда с высоким значением величины R^2 (чем

ближе значение R^2 к единице, тем надежнее линия тренда аппроксимирует исследуемый процесс).

- Используя полученные среднеарифметические значения, в программе MS Excel необходимо построить график зависимости тока короткого замыкания от угла положения солнечного элемента (тип диаграммы «Точечная»), совместив на нем данные двух исследуемых солнечных элементов.

- Для моделирования исследуемого процесса добавьте в диаграмму линию тренда с высоким значением величины R^2 (чем ближе значение R^2 к единице, тем надежнее линия тренда аппроксимирует исследуемый процесс).

- Полученные графики должны быть представлены в отчете.

- Проанализируйте полученные графики, сделайте вывод и объясните, как меняется ток короткого замыкания при изменении интенсивности источника света и угла наклона солнечного элемента.

5.2.3. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте цель лабораторной работы и поясните, как достигается поставленная цель.

2. Назовите основные элементы лабораторного стенда и объясните их назначение.

3. Что такое солнечные панели?

4. Структура солнечных панелей.

5. Моно- и поликристаллические солнечные панели. Основные технические характеристики.

6. Аморфные (тонкопленочные) солнечные панели. Основные технические характеристики.

7. Что такое номинальная мощность солнечной панели?

8. Условия испытания солнечных панелей (STC, PTC).

9. Что такое напряжение холостого хода солнечного элемента?
10. Что такое ток короткого замыкания солнечного элемента?
11. Что такое вольт-амперная характеристика (ВАХ) солнечного элемента?
12. Что такое точка максимальной мощности?
13. Что такое коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики солнечного элемента?
14. Какие существуют потери в солнечных панелях?
15. Срок службы солнечных панелей. Факторы, влияющие на ухудшение параметров солнечных панелей.
16. Как меняется ток короткого замыкания солнечного элемента при изменении интенсивности источника света? Объясните полученный результат.
17. Как меняется ток короткого замыкания при изменении угла наклона солнечного элемента? Объясните полученный результат.

5.3. Лабораторная работа №3

Вольт-амперная характеристика солнечных элементов

Цель работы. Проведение измерений для получения вольт-амперной характеристики (ВАХ) солнечных элементов и зависимости вырабатываемой мощности от приложенной нагрузки.

Перед выполнением лабораторной работы внимательно изучите рубрику 1 «Физико-технические основы фотоэлектрической солнечной энергетики».

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) является одной из основных характеристик солнечных элементов. Все типы солнечных элементов изготавливаются на основе полупроводников и, следовательно, являются нелинейными устройствами, и их пове-

дение нельзя описать линейной формулой Ома. В таких случаях часто используют графические методы. Поэтому получение качественной вольт-амперной характеристики является важной задачей при изучении энергетических и оптических свойств солнечных элементов.

Для проведения лабораторной работы вам необходимы:

- 1) стенд «Внутренний»,
- 2) солнечные элементы из комплекта стенда,
- 3) аппаратура NI (PXI - 1042Q, PXI - 8110, PXI - 6251 - M-DAQ, PXI - 4130, SCB-68).

Внимание. Перед проведением работ внимательно ознакомьтесь с инструкцией по технике безопасности и эксплуатации (рубрики 3 и 4).

5.3.1. Последовательность выполнения лабораторной работы

1. Подключите стенд «Внутренний» согласно пункту 4.2.
2. Убедитесь, что ручка регулятора электронной нагрузки «Установка тока» установлена на 0.
3. Установите ручку регулятора угла положения солнечного элемента «Склонение» на 0.
4. Чтобы начать работу, нужно нажать на кнопку «Run» во вкладке «Operate» программы. При этом крышка стенда «Внутренний» должна быть закрыта.
5. Установите ручку регулятора мощности источника света «Интенсивность света» на 100%.
6. Нажмите кнопку «Скан», программа автоматически проведет сканирование и выведет информацию на график. По завершении сканирования программа выключит кнопку «Скан». Вы получите графики, где красная кривая – зависимость напряжения от тока (вольт-амперная характеристика), а синяя – зависимость

мощности, вырабатываемой солнечным элементом, от приложенной нагрузки (тока). При малом освещении солнечного элемента относительная погрешность выводимых графиков увеличивается.

7. По полученным графикам определите максимальную мощность $P_{\text{макс}}$, эффективное напряжение $U_{\text{эфф}}$ и эффективный ток $I_{\text{эфф}}$ (рис. 5.5) и запишите их в табл. 5.5 для первого исследуемого солнечного элемента.

Внимание. После вывода графиков на экран все значения сбрасываются.

8. Повторите пункт 6 при различных значениях регулятора электронной мощности источника света «Интенсивность света» и заполните табл. 5.5 для первого исследуемого элемента. Измерения необходимо проводить 3 раза для каждого исследуемого солнечного элемента.

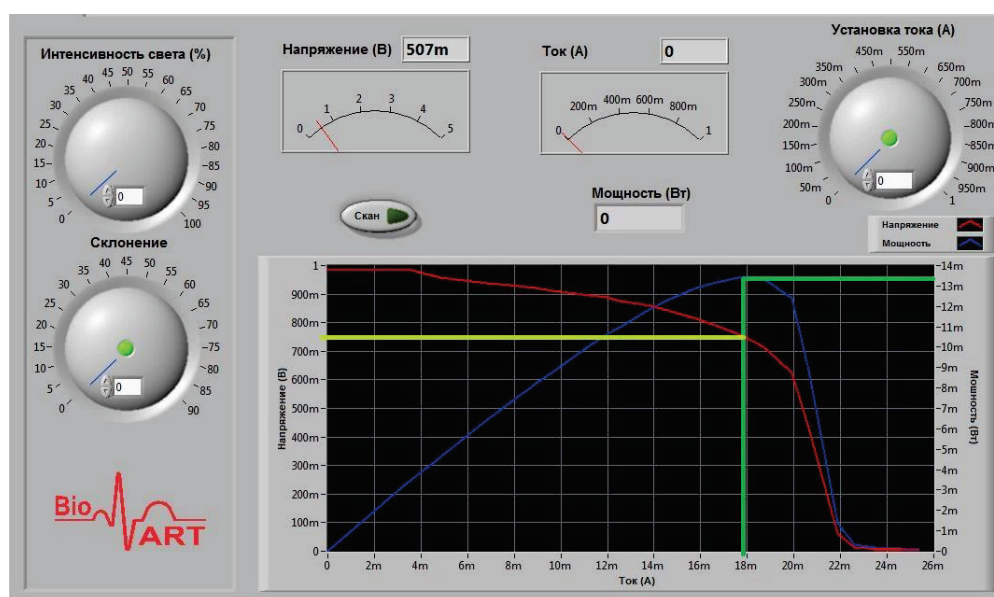


Рис. 5.5. Вольт-амперная характеристика и кривая мощности солнечного элемента

9. Остановите программу «SolarLab». Выключите выключатель на задней панели стенда. Поменяйте солнечный элемент. Включите выключатель на задней панели стенда.

10. Повторите пункты 4–8, заполняя табл. 5.5 для второго

солнечного элемента. Измерения необходимо проводить 3 раза для каждого исследуемого солнечного элемента.

11. Остановите и закройте программу «SolarLab». Выключите выключатель на задней панели.

12. Подготовьте отчет по выполненной лабораторной работе в формате Word/pdf с анализом полученных экспериментальных данных и соответствующими графиками.

Таблица 5.5

Значения максимальной мощности, эффективного напряжения и эффективного тока солнечного элемента при изменении интенсивности источника света

Элемент № _____		Мощность источника света					
Параметры	Опыт	50%	60%	70%	80%	90%	100%
$P_{\text{макс}}$, мВт	№1						
$U_{\text{эфф}}$, мВ							
$I_{\text{эфф}}$, мА							
	№2						
	№3						
Средние значения	$P_{\text{макс}}$, мВт						
	$U_{\text{эфф}}$, мВ						
	$I_{\text{эфф}}$, мА						

13. Готовый отчет отправьте на электронный адрес преподавателя, имя файла должно иметь следующую структуру: **ЗС_Фамилия1_Фамилия2.doc (или .pdf).**

5.3.2. Задание для подготовки отчета по лабораторной работе

- Полученные экспериментальные данные должны быть записаны в табл. 5.5 для двух исследуемых солнечных элементов и представлены в отчете.

- При обработке полученных экспериментальных данных используются среднеарифметические значения максимальной мощности $P_{\text{макс}}$, эффективного напряжения $U_{\text{эфф}}$ и эффективного тока $I_{\text{эфф}}$ солнечного элемента.

- Используя полученные среднеарифметические значения, в программе MS Excel необходимо построить графики зависимости максимальной мощности $P_{\text{макс}}$, эффективного напряжения $U_{\text{эфф}}$ и эффективного тока $I_{\text{эфф}}$ солнечного элемента от мощности источника света (тип диаграммы «Точечная»), совместив на одном графике данные двух исследуемых элементов.

- Полученные графики должны быть представлены в отчете.

- Проанализируйте полученные графики, сделайте вывод и объясните, как меняются значения максимальной мощности $P_{\text{макс}}$, эффективного напряжения $U_{\text{эфф}}$ и эффективного тока $I_{\text{эфф}}$ солнечного элемента при изменении интенсивности источника света.

- Сделайте вывод, зависит ли выработка энергии солнечным элементом от освещенности.

- Рассчитайте максимальную эффективность преобразования падающего оптического излучения в электрическую энергию для двух исследуемых солнечных элементов. Сделайте выводы.

Эффективность преобразования для солнечного элемента определяется как отношение выходной электрической мощности к мощности падающего оптического излучения. Для максимальной выходной мощности можно написать:

$$\eta = \frac{P_{\text{уд.макс}}}{P_{\text{пад}}} \cdot 100\%, \quad (5.1)$$

где $P_{\text{уд.макс}}$ – максимальная удельная мощность солнечного элемента при интенсивности источника света 100%, Вт/м²; $P_{\text{пад}}$ – мощность падающего оптического излучения, равна 60 Вт/м².

Максимальная удельная мощность солнечного элемента находится по формуле:

$$P_{\text{уд.макс}} = \frac{P_{\text{макс}}}{S}, \quad (5.2)$$

где $P_{\text{макс}}$ – максимальная мощность солнечного элемента при интенсивности источника света 100%, Вт; S – активная площадь солнечного элемента, равная 8000 мм² (указывается на задней стороне элемента).

Внимание. При расчете все используемые величины должны быть приведены в системе СИ: метр, Ватт, Вольт, Ампер и т.д.

5.3.3. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте цель лабораторной работы и поясните, как достигается поставленная цель.
2. Назовите основные элементы лабораторного стенда и объясните их назначение.
3. Типы солнечных фотоэлектрических систем.
4. Назначение и использование контроллеров заряда-разряда.
5. Контроллеры с широтно-импульсной модуляцией тока заряда.
6. Контроллер со слежением за точкой максимальной мощности.
7. Назначение и использование инверторов для солнечных фотоэлектрических систем.

8. Основные функциональные возможности инверторов для солнечных фотоэлектрических систем.

9. Работа солнечной панели совместно с аккумуляторной батареей.

10. Основные технические характеристики солнечных панелей (толеранс, температурный коэффициент, эффективность преобразования солнечного света, размеры и мощность).

11. Объясните влияние освещенности на мощность солнечной панели.

12. Объясните влияние температуры на мощность солнечной панели.

13. Выбор угла наклона солнечных панелей.

14. Как меняются значения максимальной мощности солнечного элемента при изменении интенсивности источника света?

15. Как меняются значения эффективного напряжения солнечного элемента при изменении интенсивности источника света?

16. Как меняются значения эффективного тока солнечного элемента при изменении интенсивности источника света?

17. Как найти эффективность преобразования падающего оптического излучения в электрическую энергию для солнечного элемента?

18. Какие величины необходимо измерить при расчете эффективности преобразования падающего оптического излучения в электрическую энергию для солнечного элемента?

Литература

1. Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Шандарова Е.Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 231 с.
2. Germany's electricity generation mix 2015. STROM-Report Renewable energy Germany, 2015. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://strom-report.de/renewable-energy/>
3. Городов Р.В., Губин В.Е., Матвеев А.С. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2009. – 294 с.
4. Atmospheric Science Data Center. NASA Surface meteorology and Solar Energy, 2016. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?>
5. Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г. и др. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. – М.: Изд-во МФТИ, 2010. – 83 с.
6. Research cell record efficiency chart. The National Center for Photovoltaics (NCPV) at the National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2015. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.nrel.gov/ncpv/>
7. Основы возобновляемой энергетики. Компания «Ваш Солнечный Дом», 2016. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.solarhome.ru/ru/basics/pv/>
8. Ali Sayigh. Comprehensive Renewable Energy. Volume One. Photovoltaic Solar Energy // Elsevier Ltd – 2012. – P. 746. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.sciencedirect.com.focus.lib.kth.se/>
9. Levent Bas. Thin film vs. crystalline silicon PV modules. Article, 2010. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.civicsolar.com/resource/thin-film-vs-crystalline-silicon-pv-modules>
10. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Энергосервис, 2003. – 162 с.



Бессель Валерий Владимирович

Исполнительный вице-президент группы компаний «НьюТек Сервисез». С 2010 г. по совместительству – профессор кафедры термодинамики и тепловых двигателей. Читает авторский курс лекций по дисциплине «Современные нефтегазовые технологии» магистрантам РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, ВШГА МГУ имени М.В. Ломоносова, Королевского Технологического Института (Стокгольм), а также специалистам ОАО «ГАЗПРОМ», НК «РОСНЕФТЬ», НК «Руснефть», ТНК-ВР, Минтопэнерго РФ, БК «Евразия», ГК «ИНТЕГРА», «CATERPILLAR – Россия».

Родился 29 июня 1958 года в городе Таллин Эстонской ССР.

В 1980 г. с отличием окончил Московский институт нефтехимической и газовой промышленности имени И.М. Губкина, во время учебы в институте являлся Ленинским стипендиатом, в 1985 году окончил аспирантуру этого же института, в 1988 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Академик Международной академии наук Экологии и Безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ) (2002).

Автор около 100 научных работ по вопросам технологий нефтегазодобычи, использования нетрадиционных источников углеводородного сырья и возобновляемых источников энергии с целью энергосбережения в ТЭК России.



Кучеров Владимир Георгиевич

Профессор Королевского технологического института (г. Стокгольм), профессор кафедры физики РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина. Читает авторские курсы на русском и английском языках студентам и аспирантам ряда российских и европейских университетов, специалистам и экспертам энергетических и инвестиционных компаний.

Исполнительный директор шведской компании Флоттен.

Родился 20 августа 1955 года в городе Москва.

В 1977 г. с отличием окончил Московский институт нефтехимической и газовой промышленности имени И.М. Губкина, в 1987 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук, в 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Автор более 100 научных работ по вопросам фундаментальных исследований углеводородных систем при сверхвысоких термобарических параметрах, генезиса углеводородов, использования возобновляемых и альтернативных источников энергии, оценки эффективности энергетических технологий.

Мингалеева Рената Дмитриевна

Ассистент кафедры термодинамики и тепловых двигателей РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.

Родилась 15 октября 1990 года в Тульской области.

В 2014 г. окончила с отличием магистратуру в РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина по совместной магистерской программе с Королевским технологическим институтом (КТН, Стокгольм, Швеция).

Автор 10 научных и учебно-методических работ по вопросам использования возобновляемых источников энергии с целью энергосбережения в нефтегазовом комплексе России.

Лауреат и призер научных конференций молодых ученых и специалистов.



УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

БЕССЕЛЬ Валерий Владимирович
КУЧЕРОВ Владимир Георгиевич
МИНГАЛЕЕВА Рената Дмитриевна

ИЗУЧЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Редактор *Л. А. Суаридзе*
Компьютерная верстка: *И. В. Севалкина*

Подписано в печать 27.07.2016. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Таймс».
Усл. п. л. 5,75. Тираж 50 экз. Заказ № 301

Издательский центр
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина
119991, Москва, Ленинский проспект, дом 65
тел./факс: (499) 507 82 12