

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Учебно-методическое пособие

Санкт-Петербург
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
2022

УДК 620.92

ББК 31.637

И18

Авторы: **В. В. Ишин, М. Р. Ермакова, Т. П. Козулина, М. А. Ревко.**

И18 Исследование характеристик фотоэлектрических модулей: учеб.-метод. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. 19 с.

ISBN 978-5-7629-3031-4

Приведены лабораторные работы по изучению режимов работы фотоэлектрических модулей, позволяющие студентам познакомиться с особенностями этого источника энергии. Работы могут использоваться в курсах «Альтернативная энергетика», «Возобновляемая энергетика» и других, затрагивающих вопросы преобразования солнечной энергии в электрическую.

Предназначено для проведения лабораторных занятий при подготовке студентов бакалавриата, специалитета и магистратуры, обучающихся на факультете электротехники и автоматики, также может быть полезно инженерно-техническим работникам и студентам других специальностей.

УДК 620.92

ББК 31.637

Рецензент канд. техн. наук В. С. Федорова (ПГУПС).

Утверждено

редакционно-издательским советом университета

в качестве учебно-методического пособия

ISBN 978-5-7629-3031-4

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022

ВВЕДЕНИЕ

Применение альтернативных источников энергии позволяет обеспечить резерв мощности (т. е. повысить уровень энергетической безопасности). А для некоторых категорий электропотребителей (удаленные от инфраструктуры объекты, временные или передвижные установки) солнце или ветер и вовсе могут стать основными источниками энергии.

Световое излучение представляет собой поток фотонов, которые несут определенный заряд энергии. Ее можно использовать для получения электрической энергии. Превращение энергии светового излучения в электричество осуществляется с помощью полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей. Солнечные панели состоят из фотоэлектрических элементов, которые соединяются в последовательные цепочки для получения требуемых параметров по напряжению, току и мощности. Соединенные определенным образом между собой модули образуют солнечные батареи. Принцип работы фотоэлектрических модулей (ФЭМ) основан на фотовольтаическом эффекте в неоднородных полупроводниковых структурах при воздействии на них светового излучения. Использование энергии фотоэлементов возможно так же, как и энергии других источников питания, с той разницей, что в цепи с солнечными элементами можно фиксировать ток короткого замыкания.

Данное пособие посвящено главному элементу солнечных энергоустановок – фотоэлектрическим модулям (солнечным панелям), которые преобразуют энергию солнечных лучей в электричество. Лабораторные работы позволят студентам понять, какие факторы оказывают влияние на эффективность работы фотоэлектрических модулей. Каждая работа посвящена одному из таких факторов.

1. ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Для выполнения лабораторных работ используется комплекс, включающий два стенда. На каждом стенде смонтированы солнечная панель, нагрузка, контроллер заряда, аккумулятор (рис. 1.1). Выводы всех элементов вынесены на лицевую поверхность стенда в виде стандартных гнезд. Соединять элементы между собой можно с помощью прилагаемых проводов. Провода имеют «проходные» разъемы-штекеры, что позволяет подключать несколько проводов в одно гнездо (например, подключать измерительные приборы).

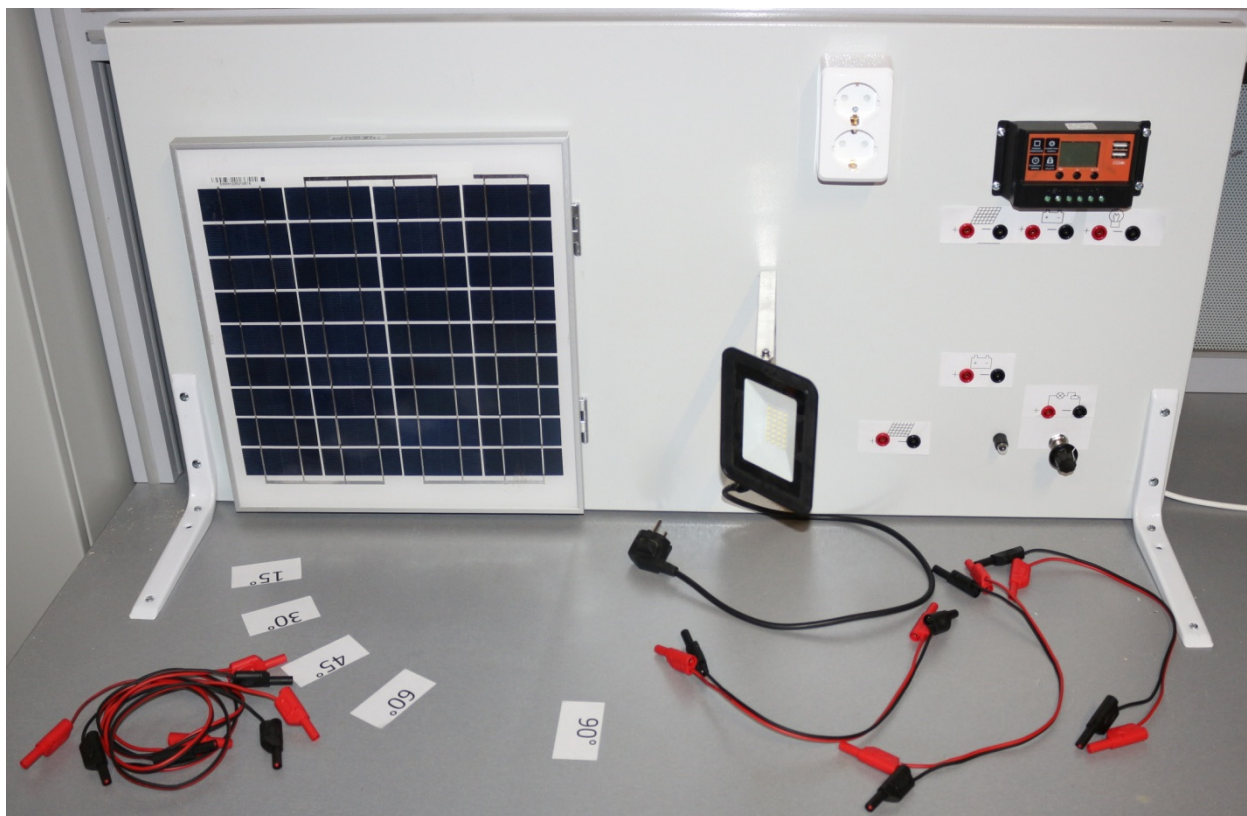


Рис. 1.1

На одном стенде размещена монокристаллическая панель, на другом – поликристаллическая, что позволяет сравнить характеристики фотоэлектрических модулей разного типа.

В состав лабораторного комплекса входят два светодиодных прожектора мощностью 20 и 50 Вт, служащие источниками светового излучения. Прожекторы имеют одинаковое крепление, поэтому на каждом стенде можно применять любой из них.

Нагрузкой на стендах является последовательное соединение лампы накаливания и потенциометра. Потенциометр позволяет изменять сопротив-

ление нагрузки, а лампа ограничивает нижний предел сопротивления, что позволяет предотвратить короткое замыкание аккумулятора.

Перед выполнением работ необходимо ознакомиться с характеристиками оборудования.

Контроллеры LandStar серии EU используют технологию ШИМ, имеют практичный дизайн и оснащены USB-розеткой совместимой с цифровой техникой.

Контроллер прост, недорог и эффективен в использовании, поддерживает

- трехступенчатую зарядку аккумуляторов: стадии насыщения, выравнивания и поддержки заряда;
- три типа аккумуляторов: герметичный (AGM), гелевый, кислотный (с жидким электролитом);
- защитные функции;
- функцию температурной компенсации батареи.

Розетка USB может использоваться для зарядки электронных устройств.

Внешний вид контроллера показан на рис. 1.2.



Рис. 1.2

Фотоэлектрические солнечные модули предназначены для использования в сетевых и автономных станциях напряжением до 1000 В. Во всех случаях использования необходимо обеспечить согласование рабочего напряжения модуля с параметрами других элементов системы: зарядным напряжением аккумуляторной батареи, номинальным напряжением шины постоянного тока инвертора и т. д. Внешний вид солнечных панелей разного типа (моно-

кристаллической и поликристаллической) показан на рис. 1.3. Параметры фотоэлектрических модулей, установленных в используемых лабораторных стендах, приведены в табл. 1.1 и 1.2.

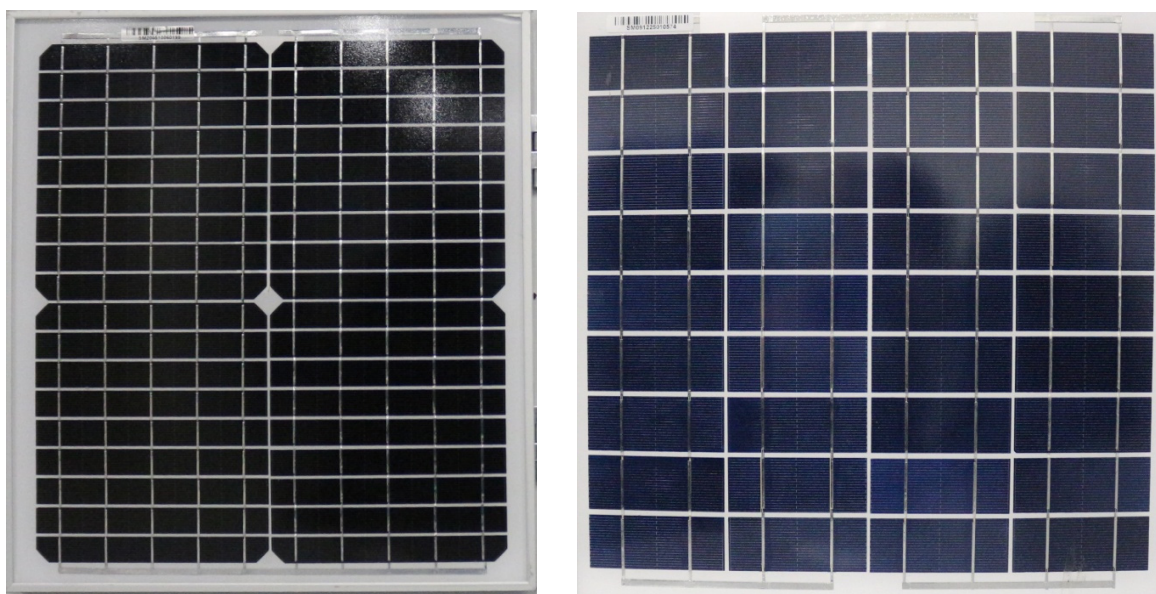


Рис. 1.3

Таблица 1.1

Механические характеристики ФЭМ

Параметр	Значение
Размеры модуля, мм	390×355×18
Толщина ячейки, мкм	220
Количество ячеек	36 (2×18 или 4×9)
Вес, кг	1,9
Фронтальное стекло	Каленое просветленное стекло 3,2 мм
Рама	Анодированный алюминий
Клеммная коробка	IP 65
Ветровая нагрузка	2400 Па
Кабели	Положительный и отрицательный выводы – кабель с двойной изоляцией, сечением 4 мм ² , длиной (L) 300 мм, разъем MC4 или совместимый с ним

Таблица 1.2

Электрические характеристики ФЭМ

Параметр		Значение
Пиковая электрическая мощность, Вт		15
Толеранс, %		От 0 до +3
Оптимальное рабочее напряжение, В		18,36
Оптимальный рабочий ток, А		0,82
Ток короткого замыкания (I_{sc}), А		0,87
Напряжение холостого хода (U_{oc}), В		22
Рабочая температура (NOCT), °C		От –40 до 85
Максимальное напряжение системы, В		1000
Максимальный номинал последовательного предохранителя		15
Категория качества		Grade A
КПД элемента ФЭМ, %		15,72
КПД ФЭМ, %		10,83
Температурные коэффициенты	NOCT	47±2°C
	Pmax	–0,45 %/°C
	Voc	–0,35 %/°C
	Isc	+0,04 %/°C

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОНО- И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Цель работы: построить ВАХ солнечных моно- и поликристаллических панелей в зависимости от интенсивности светового потока.

Ход работы

1. Подключить фотоэлектрическую панель (фотоэлектрический модуль – ФЭМ) к нагрузке (потенциометру) с вольтметром и амперметром. Амперметр включается последовательно между панелью и резистором, а вольтметр параллельно панели. Схема подключения изображена на рис. 2.1. После сборки схемы представить ее для проверки преподавателю. Неправильное подключение может сделать результаты работы неадекватными и в редких случаях привести к неисправности оборудования.

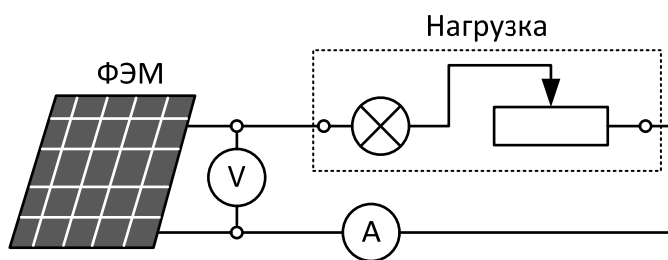


Рис. 2.1

2. Установить на стенде светодиодный прожектор мощностью 20 или 50 Вт (в ходе работы поочередно используются оба источника света). Фотоэлектрическую панель расположить перпендикулярно направлению света, т. е. параллельно плоскости стекла прожектора или просто повернуть панель до метки «90°» на столе. Включить прожектор.
3. Выполнить около 10 измерений напряжения и тока цепи при различных сопротивлениях нагрузки. Дополнительно произвести измерение напряжения холостого хода (ХХ), разорвав цепь, т. е. отключив потенциометр от панели, и напряжение и ток короткого замыкания (КЗ), исключив нагрузку из цепи и соединив провода накоротко.
4. Полученные данные занести в протокол измерений (шаблон протокола приведен в табл. 2.1).

Таблица 2.1

Тип панели: моно/поли		Мощность источника света: ____ Вт	
Номер опыта	I , А	U , В	P , Вт
1 (XX)	0		0
2			
3			
4			
5			
...			
...(КЗ)			

5. Повторить пункты 2–4 с прожектором другой мощности, а затем провести те же измерения с другим типом фотоэлектрической панели (на втором лабораторном стенде). Кроме того, можно повторить эксперимент с выключенным прожектором – в этом случае ФЭМ освещается рассеянным светом в помещении. Во всех случаях рекомендуется измерять также и освещенность панели (для измерения освещенности можно использовать люксметр или приложение «Люксметр» для смартфона).
6. Для каждого измерения вычислить мощность, выдаваемую панелью.
7. На основе полученных данных построить следующие семейства кривых:
 - вольт-амперные характеристики солнечных панелей (зависимости напряжения от тока нагрузки для разных типов панелей и мощности источника света);
 - мощностные характеристики – зависимости мощности, выдаваемой панелью, от тока нагрузки.
8. Оценить влияние мощности источника света на выдаваемую панелью электрическую мощность; сравнить характеристики монокристаллической и поликристаллической панелей, определить оптимальные режимы работы ФЭМ, рассчитать коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики.

Содержание отчета

Отчет должен содержать наименование и цель работы; схемы экспериментов; таблицы результатов измерений и расчетов; графики по экспериментальным данным; выводы.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА НАКЛОНА ПАНЕЛИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕЕ РАБОТЫ

Цель работы: исследовать эффективность работы фотоэлектрической панели в зависимости от угла падения светового потока.

Общие сведения

Наиболее эффективная работа солнечной панели наблюдается, когда она направлена перпендикулярно световому излучению. Фотоэлектрические модули (ФЭМ) как правило располагают на крыше в фиксированном положении, которое не меняется в течение дня, при этом поверхность направлена на юг (для северного полушария). Углом наклона называют угол α между горизонтальной плоскостью и солнечной панелью. Из-за движения Земли вокруг Солнца присутствуют и сезонные вариации (рис. 3.1). Зимой максимальная высота солнца над горизонтом меньше, чем летом, поэтому угол наклона для работы летом ($\alpha_{\text{л}}$) выбирается меньше, чем для работы зимой ($\alpha_{\text{з}}$). Если нет возможности менять угол наклона дважды в год, то панели должны располагаться под углом, значение которого лежит где-то посередине между оптимальными углами для лета и зимы, т. е. примерно соответствует оптимальному наклону во время осеннего и весеннего равноденствия ($\alpha_{\text{р}}$).

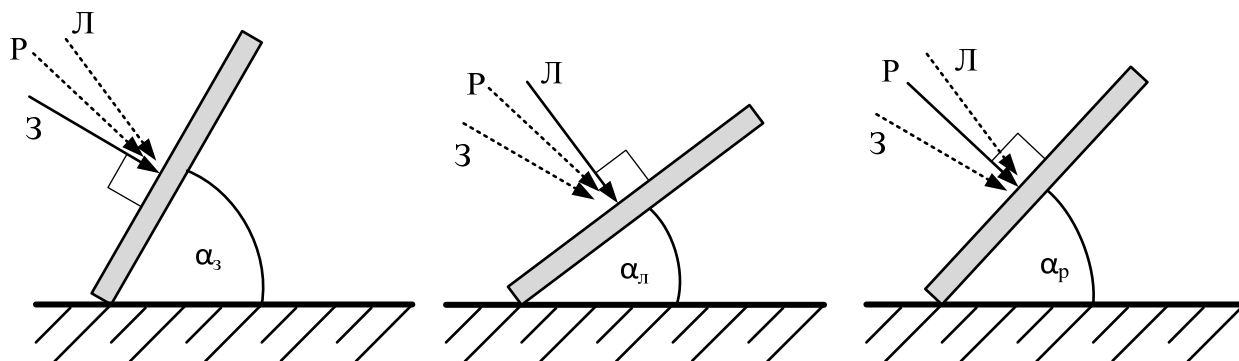


Рис. 3.1

Для каждой широты есть свой оптимальный угол наклона панелей. Только для местностей около экватора солнечные панели должны располагаться горизонтально. В данной работе требуется оценить степень влияния угла наклона солнечных панелей на эффективность их работы.

Ход работы

1. Подключить фотоэлектрическую панель к нагрузке (потенциометру) с вольтметром и амперметром. Амперметр включается последовательно между панелью и нагрузкой, а вольтметр – параллельно фотоэлектрической панели. Схема подключения изображена на рис. 2.1. После сборки схемы представить ее для проверки преподавателю. Неправильное подключение может сделать результаты работы неадекватными и в редких случаях привести к неисправности оборудования.
2. Поставить солнечную панель в положение 90° (т. е. так, чтобы световой поток падал на панель перпендикулярно);
3. Из результатов лабораторной работы в разд. 2 определить режим максимальной мощности данной панели с данным источником света (значение тока нагрузки и напряжения панели).
4. Включить источник освещения и, регулируя сопротивление потенциометра, установить ток нагрузки, обеспечивающий максимальную отдачу мощности.
5. Поворачивая панель, изменять угол падения света на ее поверхность и фиксировать ток и напряжение цепи. Выполнить таким образом несколько измерений, полученные данные занести в протокол измерений (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Тип панели: моно/поли			Мощность источника света: ____ Вт	
Режим: КЗ / XX / $P_{\text{макс}}$				
Номер опыта	Угол	I , А	U , В	P , Вт
1	90			
2	60			
3	45			
4	30			
5	15			
6	0			

6. Повторить пункты 2–5 для другого типа панели и для другого режима работы панели (короткое замыкание и холостой ход – аналогично лабораторной работе в разд. 2).

7. Для каждого измерения вычислить мощность, выдаваемую солнечной панелью в нагрузку.
8. На основе полученных данных построить семейство ВАХ солнечной панели (зависимости напряжения от тока нагрузки) и мощностных характеристик для различных углов падения света на панель.
9. Построить графики мощности и коэффициента заполнения ВАХ в зависимости от угла падения света.

Содержание отчета

Отчет должен содержать наименование и цель работы; схемы экспериментов; таблицы результатов измерений и расчетов; графики по экспериментальным данным; выводы, в которых необходимо сравнить графики, оценить влияние угла наклона на эффективность работы панели.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ОТ ОСВЕЩЕННОЙ ЧАСТИ ЕЕ ПЛОЩАДИ

Цель работы: исследовать влияние площади поглощения светового излучения на эффективность работы ФЭМ.

Общие сведения

При эксплуатации солнечной панели часть ее может быть закрыта от попадания солнечного света (в зависимости от региона и сезона – пылью, песком, листьями, снегом и т. д.). Солнечная панель состоит из определенного количества фотоэлементов, соединенных последовательно. И закрытые элементы не только не производят энергии, но и препятствуют работе остальных (освещенных) элементов. Таким образом, мощность, выдаваемая панелью, может быть не пропорциональна задействованной части ее площади. В данной лабораторной работе требуется оценить эту зависимость постепенно закрывая поверхность солнечной панели (исключая из работы некоторое число фотоэлементов).

Ход работы

1. Подключить фотоэлектрическую панель к нагрузке (потенциометру) с вольтметром и амперметром. Амперметр включается последовательно между панелью и нагрузкой, а вольтметр – параллельно нагрузке. Схема подключения изображена на рис. 2.1. После сборки схемы представить ее для проверки преподавателю. Неправильное подключение может сделать результаты работы неадекватными и в редких случаях привести к неисправности оборудования.
2. Из результатов лабораторной работы (раздел 2) определить режим максимальной мощности данной панели с данным источником света (значение тока нагрузки и напряжения панели).
3. Включить источник освещения и, регулируя сопротивление потенциометра, установить ток нагрузки, обеспечивающий максимальную отдачу мощности.
4. Рассмотреть солнечную панель, определить количество элементов и их расположение на панели (обратите внимание – у используемых панелей элементы расположены по-разному, но общее их количество одинаково).

5. Закрыть любым непрозрачным предметом один фотоэлемент. Зафиксировать ток и напряжение цепи.
6. Последовательно закрывая разное число фотоэлементов (2, 3, ...), выполнить таким образом несколько измерений, полученные данные занести в протокол измерений (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Тип панели: моно/поли			Мощность источника света: ____ Вт			
Режим: $P_{\text{макс}}$						
Номер опыта	Закрыто элементов	Рабочая площадь, %	I , А	U , В	P , Вт	$P/P_{\text{макс}}$, %
1	0	100				
2	1					
3	2					
4	3					
5	...					
...	...		0	0	0	0

7. Повторить пункты 2–6 для другого типа панели и для другого режима работы панели (короткое замыкание и холостой ход – аналогично лабораторной работе в разделе 2).
8. На основе полученных данных для каждого измерения вычислить мощность в цепи и относительную мощность (в процентах от мощности, выдаваемой полностью открытой панелью). Построить графики тока, напряжения и мощности в зависимости от используемой части площади солнечной панели.

Содержание отчета

Отчет должен содержать наименование и цель работы; схемы экспериментов; таблицы результатов измерений и расчетов; графики по экспериментальным данным; выводы, в которых необходимо сравнить графики и оценить степень влияния закрытой площади панели на эффективность ее работы.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ И ЕЕ КОМПОНЕНТОВ

Цель работы: собрать макет солнечной электростанции и исследовать его работу в разных режимах (при наличии источника света и при питании нагрузки от аккумулятора в отсутствие света).

Общие сведения

Мощность солнечных энергетических систем зависит от интенсивности солнечного излучения. Для того чтобы обеспечить бесперебойное питание потребителей независимо от времени суток и погоды, солнечные батареи снабжают аккумуляторами, которые накапливают избыточную энергию днем, а в ночное время отдают ее потребителю. Для обеспечения правильного режима работы системы «солнечная панель – аккумулятор – нагрузка» необходим контроллер. В данной лабораторной работе предлагается собрать схему со всеми элементами и смоделировать различные режимы работы солнечной электростанции.

Ход работы

1. Подключить к контроллеру нагрузку (потенциометр), используя соединительные провода. Подключить к контроллеру аккумулятор последовательно с амперметром. При подключении аккумулятора контроллер включается автоматически и определяет рабочее напряжение системы. При этом он переходит в режим питания нагрузки от аккумулятора. Обратите внимание на обозначения на экране контроллера (направление передачи энергии) и на значение тока на дисплее амперметра (положительное или отрицательное). Данное значение очевидно означает разряд аккумулятора.
2. Подключить к контроллеру солнечную панель, используя соединительные провода. Схема подключения изображена на рис. 5.1. Вольтметр можно подключать параллельно различным элементам схемы, контролируя напряжение на солнечной панели, на аккумуляторе и на нагрузке. Точки подключения вольтметра показаны на рис. 5.1. При наличии нескольких вольтметров можно контролировать напряжение всех точек (ФЭМ, аккумулятор, нагрузка) одновременно. После сборки схемы представить ее для

проверки преподавателю. Неправильное подключение может сделать результаты работы неадекватными и в редких случаях привести к неисправности оборудования.

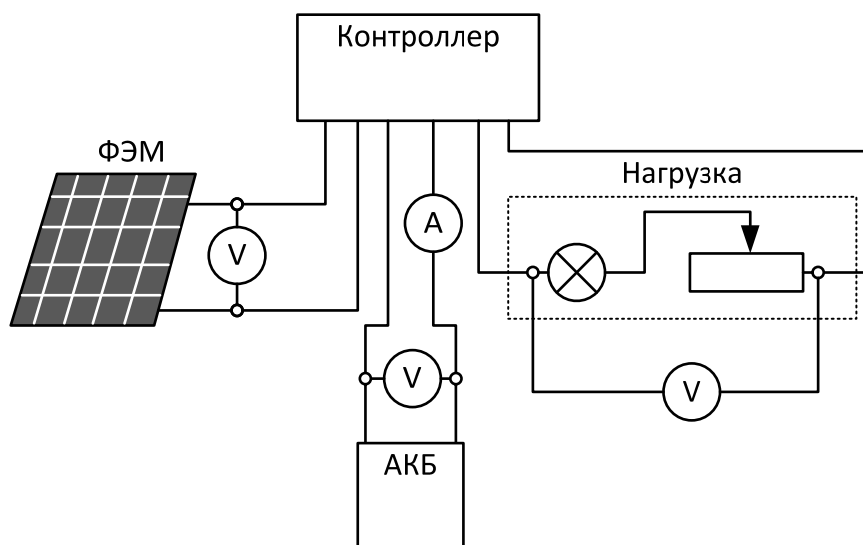


Рис. 5.1

3. Включить источник освещения и, регулируя сопротивление потенциометра, менять ток нагрузки от минимального до максимального. При этом следует контролировать напряжение на элементах схемы и ток заряда/разряда аккумулятора (обязательно зафиксировать показания в момент нулевого значения тока аккумулятора). Полученные данные занести в протокол измерений (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Тип панели: моно/поли		Мощность источника света: ____ Вт		
Номер опыта	$I_{\text{АКБ}}, \text{А}$	$U_{\text{СП}}, \text{В}$	$U_{\text{АКБ}}, \text{В}$	$U_{\text{НАГР}}, \text{В}$
1				
2				
3	0			
4				
5				
...				

4. Построить графики напряжений в зависимости от тока аккумулятора.

Содержание отчета

Отчет должен содержать наименование и цель работы; схемы экспериментов; результаты измерений и их пояснение; выводы по проделанной работе.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Да Роза А. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы: учеб. пособие / пер. с англ. М.: Изд. дом МЭИ, 2010.

Кашкаров А. П. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции: практикум. М.: ДМК Пресс, 2011.

Стребков Д. С., Тверьянович Э. В. Солнечные электростанции: концентраторы солнечного излучения: учеб. пособие. 2-е изд. М.: Юрайт, 2019.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Используемое оборудование	4
2. Исследование вольт-амперных характеристик моно- и поликристаллической солнечных панелей	8
3. Исследование влияния угла наклона панели на эффективность ее работы	10
4. Исследование зависимости мощности фотоэлектрического модуля от освещенной части ее площади	13
5. Исследование работы солнечной электростанции и ее компонентов	15
Список рекомендуемой литературы	17

Ишин Владимир Валентинович
Ермекова Мадина Рашидовна
Козулина Татьяна Павловна
Ревко Михаил Алексеевич

Исследование характеристик фотоэлектрических модулей

Учебно-методическое пособие

Редактор М. Б. Шишкова

Подписано в печать 05.05.22. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Печ. л. 1,25.
Гарнитура «Times New Roman». Тираж 46 экз. Заказ .

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197022, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5Ф