

## Термостабилизация фотоэлектрических преобразователей для измерения ВАХ с импульсным источником света

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Предложен метод термостабилизации фотоэлектрических преобразователей для измерения их вольт-амперных характеристик с использованием импульсного имитатора солнечного излучения. Обоснована актуальность исследования вольт-амперных характеристик в диапазоне температур, а также актуальность применения импульсных осветителей при обработке солнечных элементов. Приведено математическое описание для математического моделирования преобразователя с учетом температуры. Представлены результаты экспериментальной проверки термоэлектрического преобразователя при снятии темновых характеристик фотопреобразователя. Описаны параметры используемого импульсного источника света.

**Ключевые слова:** фотопреобразователь, вольт-амперная характеристика, термостабилизация, термостат, термоэлектрический преобразователь, импульсный имитатор солнечного излучения.

### Введение

Вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) различных типов зависят от рабочей температуры, которая в эксплуатации меняется в широких пределах, особенно при работе в космосе с потоками излучения АМ0.

Теоретический анализ работы ФЭП при различных температурах в основном подтверждается экспериментальными результатами. Количественная оценка зависимости характеристик реальных ФЭП от температуры представляет собой значительные трудности, что вызвано наличием целого ряда технологических факторов, присутствующих при изготовлении ФЭП и до конца не учитывающиеся современной теорией.

В паспортных данных ФЭП указывают температурные коэффициенты тока и напряжения, обычно в пределах  $+10...+80^{\circ}\text{C}$  [1]. Однако фотоэлементы космического назначения работают в более широких пределах температур ( $-60...+60^{\circ}\text{C}$ ), в которых изменение характеристик носит нелинейный характер. Наличие не соответствующих паспорту элементов может привести к сбою в работе всей БФ, что недопустимо для условий космоса. Поэтому необходимо предварительно не только подтверждать заданные параметры ФЭП, но и рассматривать полный рабочий диапазон температур, что целесообразно с точки зрения надежности и экономической эффективности.

Следовательно, учет расширенного диапазона температурных коэффициентов при моделировании и разработке фотоэлектрических батарей в настоящее время представляет собой актуальную задачу.

Важным при создании БФ космического назначения является экономический аспект, особенно для экспериментальной обработки.

Для снижения энергопотребления в отработке в последнее время применяют импульсные источники света в имитаторах солнечного излучения.

Известно множество разнообразных оптических схем и конструкций имитаторов. В идеальном случае имитаторы должны с наилучшим приближением воспроизводить все параметры солнечного излучения — параллельность лучей,

стабильность во времени и равномерность освещения, спектральный состав, плотность потока [2].

Импульсные имитаторы солнечного излучения по сравнению с другими имитаторами создают меньший добавочный нагрев солнечного элемента во время измерений, имеют близкое к АМ0 спектральное распределение и потребляет сравнительно малое количество энергии.

При проведении измерений с использованием импульсного источника солнечного излучения необходимо исключить падение напряжения на контактах и в цепи, а также контролировать температуру измеряемого элемента.

### 1. Постановка задачи исследования

Для определения характеристик СБ используют моделирование вольт-амперных характеристик СБ на основе моделирования характеристик солнечных элементов (СЭ). Существует несколько аналитических моделей ВАХ СЭ, учитывающих различные факторы. Выбор модели зависит от поставленной задачи.

Для описания характеристик фотоэлемента применяют модель Шоккли, в основу которой положено уравнение поведения идеального диода в заданных условиях фототока [3] и температуры. В этом уравнении параметры  $U_{xx}$ ,  $I_{кз}$ ,  $I_{opt}$ ,  $P_{max}$  могут определяться на основе как расчета полупроводниковой структуры, так и экспериментальных исследований.

$$I_n = I_{opt} - I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{q \cdot (U + I_n \cdot R_n)}{A_k \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{U}{R_{ш}}, \quad (1)$$

где  $I_n$  – ток нагрузки, А;

$I_{opt}$  – значение тока в оптимальной точке при различных температурах, А;

$I_0$  – обратный ток насыщения, А;

$q$  – заряд электрона,  $q=1,6 \cdot 10^{-17}$  Кл;

$U$  – напряжение на нагрузку, В;

$R_n$  – последовательное сопротивление, Ом;

$A_k$  – диодный коэффициент;

$k$  – постоянная Больцмана,  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж;

$T$  – абсолютная температура СЭ, К;

$R_{ш}$  – шунтовое сопротивление, Ом.

Данная модель отличается введением следующих переменных [4]:

- напряжение холостого хода при изменении температуры:

$$U_{xxt} = U_{xx} + dU_t (T_0 - T), \quad (2)$$

где  $U_{xx}$  – напряжение холостого хода при стандартной температуре и изменении освещенности

$$U_{xx} = \frac{A_k \cdot k \cdot T}{q} \ln\left(\frac{I_{opt}}{I_0} + 1\right), \quad B, \quad (3)$$

$dU_t$  – температурный коэффициент по напряжению, мВ/°С;

$T_0$  – стандартная температура,  $T_0=+25^\circ\text{C}$ ;

- значение тока при различных температурах и освещенностях

$$I_{opt} = I_{кз} \cdot (E_{ФЭП} / E_0) - dI_t \cdot (E_{ФЭП} / E_0) (T_0 - T), \quad (4)$$

где  $I_{кз} \cdot (E_{ФЭП}/E_0)$  – изменение тока короткого замыкания по освещенности;  
 $E_0$  – значение освещенности при стандартных условиях,  $E_0=1000$  Вт/м<sup>2</sup>;  
 $E_{ФЭП}$  – среднемесячное среднее дневное значение плотности солнечного излучения, поступающего на поверхность ФЭП, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $dl_t$  – температурный коэффициент по току, мкА/°С.

$$R_n = \frac{(U_{opt} + dU_t \cdot [T_0 - T])}{\left( I_{opt} \cdot \left( \frac{E_{ФЭП}}{E_0} \right) \right) - dl_t \cdot \left( \frac{E_{ФЭП}}{E_0} \right) \cdot (T_0 - T) \cdot r_d}, \quad (5)$$

где  $r_d$  – дифференциальное сопротивление, находящееся в начале участка освещения;

$U_{opt}$  – напряжение в оптимальной точке, В.

Обратный ток насыщения зависит от температуры:

$$I_0 = \frac{I_{opt}}{\exp\left(\frac{(q \cdot U_{xx} \cdot t)}{(A_k \cdot k \cdot (T + 273))}\right)}. \quad (6)$$

Максимальная мощность

$$P_{max} = U_{opt} \cdot I_{opt}. \quad (7)$$

Как видно, при моделировании ФЭП с анализом температуры необходимо учитывать коэффициенты по току и по напряжению.

Температурные коэффициенты тока и напряжения измеряют согласно методике, определенной международным стандартом [5].

Так как для фотопреобразователей космического назначения предусматривается работа в диапазоне температур, который отличается от данных в паспорте, актуальной задачей является применение данной модели и учет коэффициентов  $dl_t$  и  $dU_t$  в расширенном диапазоне температур.

## 2. Виды термостабилизаторов и преимущество метода термоэлектрической стабилизации температуры

В настоящее время существует множество методов термостабилизации, основанных на различных механизмах термостатирования, например, прокачка жидкости постоянной температуры, использование джоулева нагрева, достижение и поддержание температуры с помощью химических реакций и т.д. Однако большинство этих методов требуют использования специальной аппаратуры, малоэффективны для термостатирования малых объемов, не имеют возможности плавной регулировки температуры, а также обладают большой инерционностью. Так, например, для стабилизации температуры методом прокачки жидкости постоянной температуры необходима холодильная установка, насосы, система трубопроводов.

Для решения задачи стабилизации температуры фотопреобразователей наиболее подходящим из перечисленных выше методов является метод термоэлектрической стабилизации температуры. Метод основан на эффекте Пельтье, который заключается в том, что при пропускании постоянного тока через два проводника из разных материалов, спаянных на концах, один из спаев нагревается, а другой охлаждается. Благодаря данному механизму нагрева или охлаждения в зависимости от направления тока можно, плавно меняя величину

тока, также плавно менять величину температуры на спаях. Основным преимуществом этого метода является то, что при преобразовании электрической энергии в тепловую можно осуществлять не только нагрев, но и охлаждение в отличие от джоулева нагрева. К тому же для данного метода термостабилизации необходимо сравнительно малое количество энергии, кроме того, установка имеет повышенную надежность ввиду отсутствия вращающихся узлов.

Недостатком термоэлектрического охлаждения является необходимость охлаждать поверхность горячих спаев, что усложняет конструкцию термостабилизирующей установки.

Таким образом, можно сделать вывод, что метод термоэлектрической стабилизации температуры имеет плавность регулировки температуры, обладает малой инерционностью, а также высокоэффективен для малогабаритных установок. Кроме того, используя линейную зависимость температуры от тока, представляется возможным автоматизировать процесс термостабилизации.

В основе любого термоэлектрического прибора лежит термоэлемент, представляющий собой соединенные последовательно две полупроводниковые ветви, одна из которых обладает электронной, а другая – дырочной проводимостью. При прохождении через термоэлемент постоянного электрического тока между коммутационными пластинами, осуществляющими спай термоэлемента, возникает разность температур, обусловленная выделением на спае 1 и поглощением на спае 2 теплоты Пельтье. Если при этом за счет теплоотвода температуру спая 1 поддерживать на постоянном уровне, то температура спая 2 понизится до некоторого определенного значения.

При заданном токе величина понижения температуры зависит от тепловой нагрузки на нем. Эта нагрузка складывается из теплопритока от окружающей среды, тепла, приходящего от одного спая, обусловленного теплопроводностью образующих термоэлемент ветвей, и теплоты Джоуля, выделяющейся в ветвях термоэлемента при прохождении через них тока [6].

Количество теплоты Пельтье  $Q_{\Pi}$  пропорционально силе тока  $I$  и коэффициенту Пельтье  $\pi$ , который зависит от свойств материалов, находящихся в контакте:

$$Q_{\Pi} = \pi \cdot I. \quad (8)$$

Существенное влияние на работу термоэлемента оказывает теплота Джоуля, которая прямо пропорционально зависит от напряжения  $U$ , силы тока и температуры спая  $t$ :

$$Q_{дж} = U \cdot I \cdot t. \quad (9)$$

Преимуществом термоэлемента является возможность работы в реверсивном режиме – при изменении направления тока охлаждаться будет спай 1, а нагреваться — спай 2 [7].

### **3. Экспериментальная проверка термостабилизатора при снятии темновых характеристик ФЭП**

В некоторых случаях оценить работоспособность СБ представляется возможным только по их темновым характеристикам, так как не всегда имеются в распоряжении солнечные имитаторы, позволяющие равномерно освещать очень

большие площади и объемы, и, кроме того, крупные составные батареи, уже смонтированные на космическом корабле, не всегда можно раскрыть для измерений.

При темновых измерениях батарею подключают к внешнему источнику постоянного тока, создавая электрическое смещение в прямом направлении. Последовательно изменяя напряжение, измеряют темновую характеристику солнечных элементов, фактически представляющих собой диодную матрицу. Ток батареи и напряжение смещения записываются автоматически.

Точность темнового метода зависит от точности измерения и от однородности распределения температуры по всей батарее. Подключение внешнего источника приводит к увеличению её температуры во время испытаний и соответственно к дополнительной погрешности. Поэтому желательно применять импульсное (с выдержкой до 10 секунд) смещение.

Целесообразно проводить снятие темновых характеристик для проверки термостабилизации ФЭП ввиду того, что темновые измерения ВАХ схожи с измерениями, проводимыми с импульсным источником света: в обоих случаях выделяется малое количество энергии и нагрев фотоэлемента одинаково мал. Поэтому успешные испытания стабилизатора температуры при темновых измерениях оправдывают организацию эксперимента по снятию световых характеристик термостабилизируемых ФЭП с использованием импульсного источника излучения.

Для экспериментальной проверки был использован ТЭЛП типа С2-3 как термостабилизирующее устройство. При этом были заданы режимы по температуре в диапазоне от 10 до  $60 \pm 0,5^\circ\text{C}$  с шагом  $10^\circ\text{C}$ . При снятии характеристик в прямом включении р-п-перехода напряжение источника питания изменяется от 0 до 12 В, что обеспечивает неповреждающие измерения при снятии зависимости тока от напряжения. При обратном включении р-п-перехода к источнику питания ток перехода увеличивали до момента резкого изменения напряжения на переходе или до максимально возможного тока в соответствии с площадью ФЭП (не более  $100 \text{ mA/cm}^2$ , что ограничено тепловыми характеристиками ФП).

Для поддержания температуры ФЭП на заданном уровне и с необходимым допуском использовали термоэлектрическую батарею. Поддержание температуры обеспечивалось изменением тока питания батареи от источника ТЕС-41. Температуру термостабилизатора и, соответственно, ФЭП определяли по платиновому термометру сопротивления типа ИС-1 по методу стабильного тока, который проходит через датчик температуры, а падение напряжения на датчике температуры (является функцией температуры) измерялось цифровым прибором М3500.

ФЭП включали последовательно в цепь стабильного источника питания с изменяемым током. Ток и напряжение темновой ВАХ определяли четырехзондовым методом. Напряжение измеряли непосредственно на ФЭП универсальным цифровым прибором М3500. Ток ФЭП измеряли на основе шунтового метода также прибором М3500.

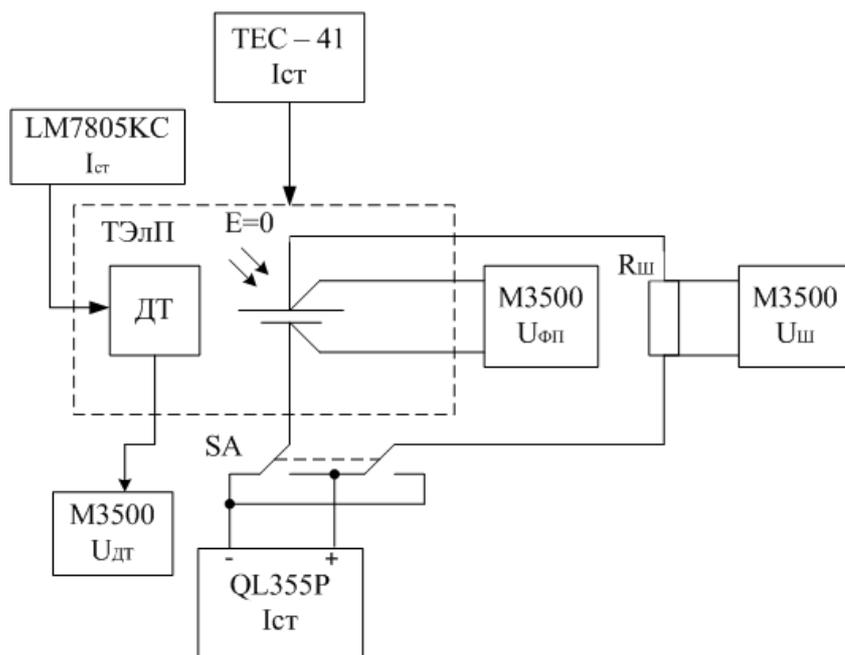


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки:  
 ТЕС-41 - стабилизированный источник постоянного тока с изменяемой полярностью; М3500 - универсальный измерительный прибор; LM7805KC - стабилизирующий источник тока; ДТ - датчик температуры; QL355P – источник стабильного питания;  $R_{ш}$  - шунтирующее сопротивление 0,1 Ом

По результатам эксперимента были построены ВАХ для прямого (рис. 2) и обратного (рис. 3) включения р-п-перехода, которое определяется полярностью приложенного к переходу напряжения. Были построены графики, показывающие изменение значений тока (рис. 4) и напряжения (рис. 5) с ростом температуры.

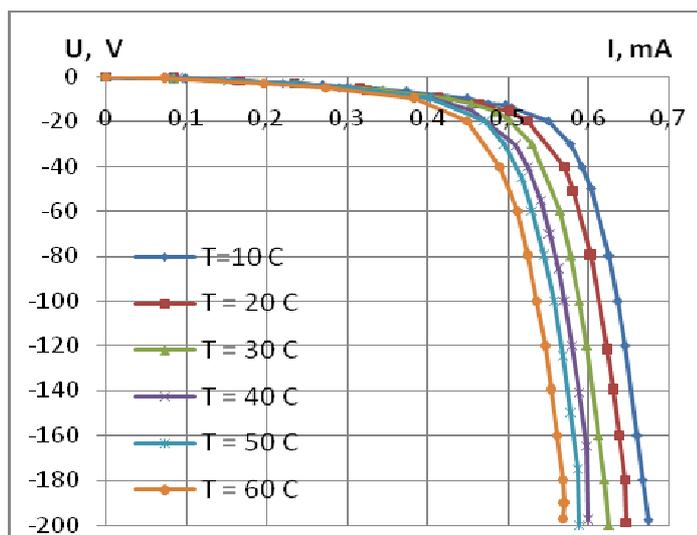


Рис. 2. ВАХ для прямого включения р-п-перехода

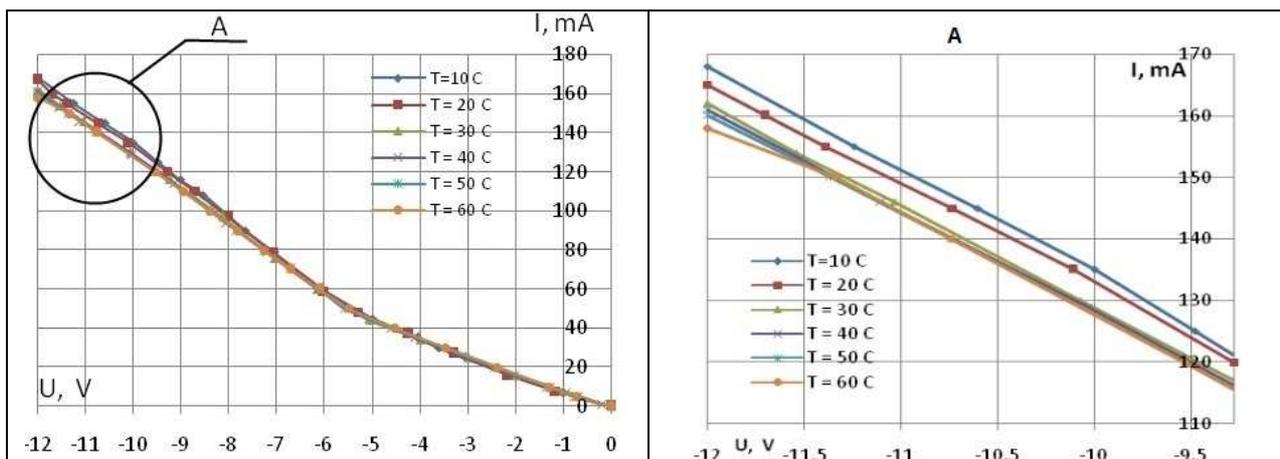


Рис. 3. ВАХ для обратного включения р-п-перехода

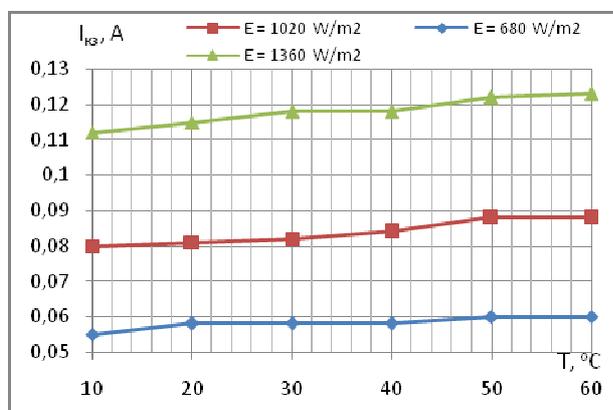


Рис. 4. Зависимость тока от температуры

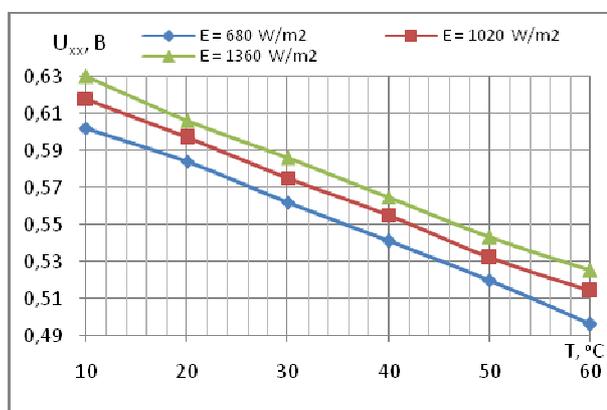


Рис. 5. Зависимость напряжения от температуры

Как видно из ВА характеристик прямого включения ФП, показанных на рис. 2, при увеличении температуры происходит следующее:

1. Напряжение ФЭП при фиксированных значениях тока после перегиба характеристики уменьшается с ростом температуры.

2. Уменьшение напряжения от температуры для равных значений тока составляет  $\approx 0,2$  мВ/°С, что соответствует температурным коэффициентам напряжения (ТКН) обычных полупроводниковых структур на основе Si.

Из вольт-амперных характеристик обратного подключения, показанных на рис. 3, видно следующее:

1. Наблюдается четкий перегиб в области ( -5... -6) В. Это свидетельствует о том, что во время эксперимента в этой области наступал тепловой пробой ФЭП.

2. До точки теплового пробоя вольт-амперные характеристики ФЭП носят линейный характер и не наблюдается изменение обратного напряжения от температуры.

3. За точкой теплового пробоя заметно изменение обратного напряжения от температуры, но с меньшим показателем по ТКН, что объясняется тепловым действием обратного тока.

#### 4. Характеристики импульсного источника света

Для проведения измерений планируется применение импульсного источника света, который содержит импульсную ксеноновую лампу, светофильтр, корректирующий спектр излучения импульсной ксеноновой лампы, линзу Френеля (или параболическое зеркало) для выравнивания плотности светового потока по площади.

В данной работе расчет проводили на импульсную ксеноновую лампу класса ХОР. Спектр потока, излучаемого лампой, как и у всех ксеноновых ламп, почти непрерывен диапазоном от 200 до 1000 нм [9].

Цветовая температура лампы составляет 5600К. Импульсные ксеноновые лампы работают в балластной цепи резонансного типа. Кроме того, им требуется электронное устройство для зажигания около 10 кВ и, для большей мощности, трансформатор для согласования напряжения цепи до напряжения, необходимого лампе. Эти лампы обладают мгновенным зажиганием и повторным зажиганием, им не требуется время для нагрева.

Лампы этого класса имеют срок службы от 250 до 500 часов при 20%-ных потерях световых характеристик после 250 отработанных часов.

Лампы класса ХОР не нуждаются в принудительном воздушном охлаждении. Они не выделяют озона. Но так как они дают коротковолновое УФ-излучение, они должны работать при защитном экране, чтобы не нанести вред глазам и кожному покрову человека. Из-за высокого стартового напряжения держатели ламп должны быть изолированы от источников света.

При измерении ВАХ для данной работы планируется использование лампы ХОР-15. Основные характеристики линейной лампы: диаметр – 12 мм; длина – 395 мм; мощность – 1000 Вт; светоотдача – 5 лм/Вт; ток постоянный – 10,7 А. За время до 5 мс отдача импульса составляет 17 кВт.

Энергию  $Q$ , переносимую излучением оптической области спектра (энергия излучения), определяется по соотношению

$$Q = P_i \cdot t_i, \quad (10)$$

где  $P_i$  – мощность излучения, Вт;

$t_i$  – время импульса, с.

Для лампы ХОР-15 энергия излучения будет равняться

$$Q = 17 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 85 \text{ Дж.}$$

Эту тепловую энергию, которая передается от импульсной лампы на ФЭП, необходимо поглощать, что является причиной организации температурной стабилизации.

#### 5. Перспективы создания термостабилизации с микроконтроллерным управлением

Перспективой реализации является термостабилизатор с микроконтроллерным управлением, который представляет собой элемент установки для измерения ВАХ солнечных элементов с импульсным источником света. Микроконтроллер предназначается для автоматического регулирования температуры термoelementa с обратной связью через датчик.

Существуют уже готовые решения применения микроконтроллеров для терморегулирования различных объектов в широких диапазонах температур с

достаточно малыми интервалами [8]. Обычно микроконтроллерный регулятор температуры состоит из датчиков температуры и перегрева, встроенных в контролируемый объект, микроконтроллера, индикатора и регулятора. С помощью встроенных в контролируемый объект датчиков микроконтроллер получает необходимую информацию о его температурном состоянии и может вести анализ согласно программе, занесенной в его память. Возможна визуализация работы устройства благодаря связанному с микроконтроллером индикатору. Микроконтроллер управляет широтно-импульсным регулятором мощности. Регулятор связан с силовой частью прибора с индуктивно-емкостным фильтром. Силовая часть питается от сети переменного тока с напряжением 220 В и осуществляет работу конечной нагрузки.

### Заключение

Рассмотрена задача термостабилизации фотоэлектрического преобразователя при измерении ВАХ ФЭП с импульсным источником солнечного излучения. Предложен метод термоэлектрической стабилизации для подтверждения заданных в паспорте параметров ФЭП и определения параметров в реальном рабочем диапазоне температур.

Предложенный метод термостабилизации основан на термоэлектрическом преобразователе и является эффективным ввиду достаточно высокого уровня надежности, относительно низкого энергопотребления и возможности работы в реверсивном режиме.

Проведена экспериментальная проверка термоэлектрического преобразователя при снятии темновых характеристик фотопреобразователя. Результаты эксперимента подтверждают возможность исследования вольт-амперных характеристик в расширенном диапазоне температур с термоэлектрической стабилизацией.

### Список литературы

1. 29.5% NeXt Triple Junction (XTJ) Solar Cells [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://www.spectrolab.com/DataSheets/cells/PV%20XTJ%20Cell%205-20-10.pdf> – 20.05.2010 г.
2. Колтун, М.М. Оптика и метрология солнечных элементов [Текст] / М.М. Колтун. - М.: Энергоатомиздат, 1983. – 365 с.
3. Бордина, Н.М. Моделирование вольт-амперных характеристик солнечных элементов и солнечных батарей [Текст] / Н.М. Бордина, В.А. Летин. – М.: Информэлектро, 1986. – 62 с.
4. Юревич, Е.В. Построение математической модели комбинированного приемника солнечного излучения с голографическим концентратором [Текст] / Е.В. Юревич, С.В. Губин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 5(82). – С. 56-60.
5. IEC International Standard 60904-1. Photovoltaic devices – Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics [Текст]. – Second edition; intr. 2006-09. – International Electrotechnical Commission, 2006.
6. Коленко, Е.А. Термоэлектрические охлаждающие приборы [Текст] / Е.А. Коленко. – Л.: Наука, 1967. – 280 с.
7. Поздняков, Б.С. Термоэлектрическая энергетика [Текст] / Б.С.

Поздняков, Е.А. Коптелов. – М.: Атомиздат, 1974. – 264 с.

8. Измерители-регуляторы температуры [Электронный ресурс] – Режим доступа [http://icm-tec.com/main1\\_8.htm](http://icm-tec.com/main1_8.htm).

9. ХОР 15-OF 1CT Datasheet [Текст] – Koninklijke Philips Electronics N.V. – 13.10.2009 г.

**Рецензент:** д-р технических наук, проф., заместитель генерального директора по научной работе В.Н. Борщов, Научно-исследовательский технологический институт приборостроения, Харьков.

Поступила в редакцию 11.12.12

## **Термостабілізація фотоелектричних перетворювачів для вимірювання ВАХ з імпульсним джерелом світла**

Запропоновано метод термостабілізації фотоелектричних перетворювачів для вимірювання їх вольт-амперних характеристик з використанням імпульсного імітатора сонячного випромінювання. Обґрунтовано актуальність дослідження вольт-амперних характеристик у діапазоні температур, а також актуальність застосування імпульсних освітлювачів при відпрацьовуванні сонячних елементів. Наведено математичний опис для математичного моделювання перетворювачів з урахуванням температури. Подано результати експериментальної перевірки термоелектричного перетворювача при зніманні темнових характеристик фотоперетворювача. Описано параметри імпульсного джерела, що використовується.

**Ключові слова:** фотоперетворювач, вольт-амперна характеристика, термостабілізація, термостат, термоелектричний перетворювач, імпульсний імітатор сонячного випромінювання.

## **Thermal stabilization of solar cells for current-voltage characteristics measurement with the pulsed light source**

This work presents the method of thermal stabilization of the solar cells for their current-voltage characteristics measurements with the help of pulsed light source. The relevance of current-voltage characteristics investigation in the temperature range, as well as the reason of application of the pulsed light source for solar cells workout are substantiated. The mathematical formulation for the solar cell mathematical simulation taking into account temperature changes is described. The results of the thermal transducer experimental validation by the solar cell dark characteristics measurement are presented. The used pulsed light source parameters are described.

**Keywords:** solar cell, current-voltage characteristic, thermal stabilization, thermostat, thermoelectric transducer, pulse solar simulator.