

УДК 629.7.064.56(03)

С. В. ГУБИН, А. В. ГУДКОВА, М. Н. НАКАЗНЕНКО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Предложен метод термоэлектрической стабилизации температуры при измерениях параметров фотоэлектрических преобразователей в расширенном диапазоне температур для повышения точности предпроектного моделирования солнечных батарей космического назначения. Представлен исполнительный блок термостабилизатора, разработанный для экспериментального подтверждения применимости предложенного метода. Описано моделирование процесса термостабилизации в программном модуле SolidWorks Flow Simulation. Проанализированы полученные результаты и сделаны выводы о необходимости дальнейшей доработки системы для достижения необходимого диапазона температур.

Ключевые слова: *фотопреобразователь, тепловые характеристики, термостабилизация, моделирование, модуль Пельтье.*

Введение

Параметры солнечных элементов измеряют для анализа их энергетических возможностей при определенной плотности потока излучения в узком диапазоне рабочей температуры. Существует ряд достаточно точных методик, позволяющих по измеренным темновым и световым вольт-амперным характеристикам рассчитать значения энергетических параметров фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) и оценить эффективность работы преобразователей в составе солнечной батареи системы энергоснабжения, работающей в широком диапазоне освещенности и температуры.

Характеристики фотоэлектрических преобразователей различных типов зависят от рабочей температуры, которая в эксплуатации меняется в широких пределах, особенно при работе в космосе с потоками излучения в условиях нулевой массы АМ0. Однако количественная оценка зависимости характеристик реальных ФЭП от температуры в широком диапазоне представляет собой значительные трудности, что вызвано наличием целого ряда технологических факторов, присутствующих при измерении параметров ФЭП.

В связи с растущим объемом выпуска и коммерциализации ФЭП возникает необходимость расширенного определения их параметров и характеристик с учетом тепловых свойств.

Постановка задачи исследования

В паспортных данных ФЭП [1-3], выпускаемых современными производителями, указаны темпера-

турные коэффициенты тока и напряжения как линейно изменяющиеся характеристики в положительном диапазоне температур. Однако фотоэлементы космического назначения работают в более широких температурных пределах. Так, например, температура фотопреобразователей при работе на низких орбитах лежит в пределах от минус 70...80°C в момент выхода из тени до равновесной +55...65°C при работе на освещенном участке. Ввиду этого возникает необходимость исследовать характер изменения параметров ФЭП не только в положительном, но и в отрицательном диапазоне температур, в котором, как отмечено в [4], изменение характеристик имеет нелинейный характер.

Расширение диапазона паспортных характеристик температурных коэффициентов позволяет повысить точность предпроектного моделирования солнечных батарей для условий космоса. Поэтому возникает необходимость учета расширенного диапазона температурных коэффициентов, прежде всего, при моделировании и разработке фотоэлектрических батарей. Необходимо предварительно не только подтверждать заданные параметры БФ на основе ФЭП, но и рассматривать полный рабочий диапазон температур, что является рациональным с точки зрения надежности и экономической эффективности. Для этого целесообразным является создание комплекса, который позволит снимать характеристики ФЭП в условиях изменяющейся температуры для анализа условий космического полета с фиксированными значениями.

Для решения задачи стабилизации температуры фотопреобразователей как в области отрицательных, так и положительных значений, наиболее

подходящим из существующих методов является метод термоэлектрической стабилизации. Основным преимуществом этого метода является то, что при преобразовании электрической энергии в тепловую, можно осуществлять не только нагрев, но и охлаждение. К другим преимуществам системы, основанной на термоэлектрических модулях (ТЭМ), которые также называют модули Пельтье, можно отнести отсутствие механически подвижных узлов, отсутствие необходимости в дополнительной подаче теплоносителя, сравнительно малое энергопотребление, малые габариты, высокий ресурс, плавное регулирование температуры, малая инерционность. Кроме того, используя линейную зависимость температуры от тока возможно автоматизировать процесс термостабилизации. Модули Пельтье в настоящее время широко применяются для решения различных задач, а их различные модификации имеются в открытой продаже. Такой модуль совместно с теплоотводом позволит сбрасывать тепло, поступающее от имитатора солнечного излучения и поддерживать требуемую температуру фотопреобразователя при измерении его ВАХ.

Построение модели исполнительного блока термостабилизатора

Для экспериментального подтверждения предложенного метода исследования характеристик ФЭП в широком диапазоне температур (включая отрицательный), был разработан исполнительный термостабилизирующий блок, основным элементом которого является модуль Пельтье. Компонентная схема исполнительного блока термостабилизатора показана на рис. 1.

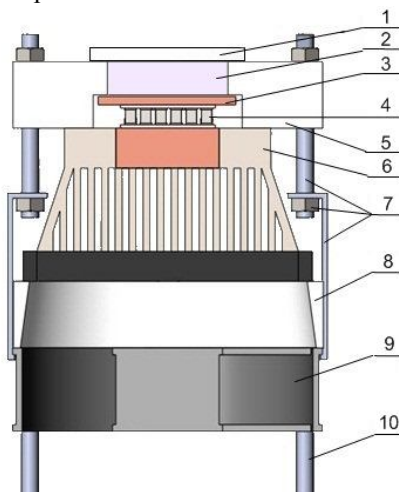


Рис. 1. Компонентная схема исполнительного блока термостабилизатора:

- 1 – крышка/стекло; 2 – охлаждаемый объем;
- 3 – медная пластина; 4 – модуль Пельтье;
- 5 – термокамера; 6 – радиатор; 7 – элементы крепления;
- 8 – диффузор; 9 – вентилятор; 10 – стойка

Для отвода тепла с горячей стороны ТЭМ используется воздушный медно-алюминиевый радиатор, который охлаждается вентилятором. Между вентилятором и радиатором установлен диффузор, выполненный из теплоизолирующего материала, с вырезом в виде конического отверстия для улучшения всасывания воздуха вентилятором. Для теплового демпфирования на холодную поверхность ТЭМ установлена медная пластина, которая термокамерой прижимается к радиатору. В пластине имеется вырез, который создает охлаждаемый объем. На медную пластину помещается ФЭП, сверху объем накрывается стеклоблоком при световых испытаниях или теплоизоляционной крышкой – при темновых.

Для уменьшения контактного сопротивления горячая и холодная поверхность ТЭМ в местах контакта с радиатором и пластиной смазаны пастой кремнийорганической термостойкой КПТ-8.

Несущим блоком конструкции является вентилятор, к верхней стороне которого закреплены исполнительные элементы, а нижняя образует зону всасывания. Крепеж исполнительных элементов осуществляется скобами и болтами.

Анализ модели исполнительного блока термостабилизатора

Для моделирования теплообмена в системе, в настоящее время существует множество средств моделирования тепловых режимов: Flomerics Flotherm, ANSYS Icepack и др. В данной работе был выбран программный модуль Flow Simulation, интегрируемый в систему SolidWorks. Полная интеграция Flow Simulation в SolidWorks дает возможность моделировать геометрию и выполнять все расчеты и анализы «в одном окне». Это значительно снижает вероятность возникновения ошибок импорта/экспорта геометрии через промежуточный формат данных.

С помощью программного модуля SolidWorks Flow Simulation было проведено моделирование процесса стабилизации температуры ФЭП. Поставленная задача решалась в три этапа. Первый этап заключался в создании моделей и сборки, второй этап – выполнялось моделирование задачи, третий этап – вывод и обработка результатов.

Модель исполнительного блока термостабилизатора была построена в системе трехмерного твердотельного моделирования SolidWorks в виде трехмерной сборки. Для упрощения модели были исключены элементы крепления: болты, гайки, стойки, скобы.

Одним из преимуществ системы Flow Simulation является то, что в ней имеется инженерная база

данных, куда сразу заложены исходные и выходные параметры, которые учитываются при вычислениях. Flow Simulation не решает их во время анализа, что позволяет сократить время расчета. Инженерная база данных включает в себя информацию по физическим свойствам газообразных и жидких веществ, свойства пористых материалов, свойства поверхностей радиационного теплообмена, значения коэффициента контактной теплопроводности, характеристики теплообменников, вентиляторов, модулей Пельтье и т.д. [5]. Для решения данной задачи использован теоретический вентилятор из инженерной базы, который полностью определяется кривой, описывающей группированную зависимость объемного расхода и перепада давления. Также было использовано теоретическое охлаждающее устройство Пельтье, которое определяется по разнице максимальной температуры, которую оно может выработать. Кроме того, оставлена возможность самостоятельно определять кривые вентилятора и задавать характеристики термоэлектрических модулей. Ввиду этого из модели также были исключены вентилятор и модуль Пельтье, которые в дальнейшем задавались из базы данных. Упрощенная модель представлена на рис. 2.

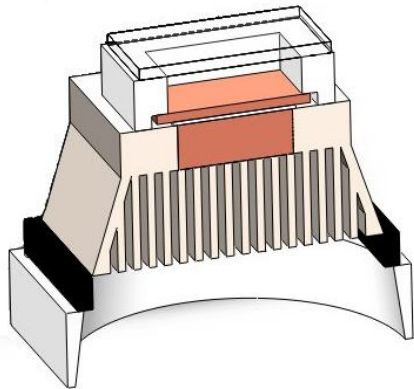


Рис. 2. Упрощенная модель исполнительного блока термостабилизатора для моделирования в программе SolidWorks Flow Simulation

Создание проекта для моделирования выполнялось в несколько этапов, на которых заданы система исчисления, тип анализа, в котором учитывается ход течения времени и действия сил гравитации и вращения, свойства воздуха или жидкости, параметры для тепловой задачи, внутренние условия (давление, температура, параметры турбулентности), параметры конечно-элементной сетки. В расчет были включены следующие параметры:

1. Вентилятор Internal Outlet Fan – был выбран из инженерной базы данных: осевой вентилятор Delta FF61, базовая ось – вертикальная (x).

2. Виртуальный модуль Пельтье. В инженерной базе данных существует множество уже опреде-

ленных термоэлектрических модулей. Однако в данной работе для соответствия с реальным экспериментом, а также возможности дальнейшего сравнения экспериментальных данных с результатами моделирования, в базу был введен новый элемент, характеристики которого были взяты из паспорта термоэлектрического модуля Stonecold PM-40X40-89 (который запланирован к применению в составе термостабилизатора при проведении эксперимента). Характеристики модуля Пельтье Stonecold PM-40X40-89 представлены в табл. 1.

3. Поверхностный источник тепла – поток солнечного излучения, падающий на поверхность ТЭМ:

$$Q = E_0 \cdot S = 2176 \text{ (Вт)}, \quad (1)$$

где $E_0 = 136 \text{ мВт/см}^2$ – солнечная постоянная;

$S = 16 \text{ см}^2$ – площадь поверхности, на которую падает поток (медная пластина).

4. Излучающая поверхность – поверхность ребер радиатора, тип «Real surface» с характеристиками алюминия.

Таблица 1
Характеристики модуля Пельтье
Stonecold PM-40X40-89

Характеристика	Температура горячих спаев, °С	
	25	50
Максимальный ток, А	10,5	10,5
Максимальное напряжение, V	15,2	17,4
Максимальный перепад температур между спаями, °С	66	75
Максимальная холодопроизводительность, Вт	85	96
Сопротивление, Ом	1,08	1,24
Габаритные размеры $S_h \times S_c$, мм ²	40 x 40	
Высота, мм	3,3	

Результаты моделирования

После создания проекта моделирования и задания всех необходимых параметров был проведен расчет в системе Flow Simulation. Расчет проводился для значений тока на ТЭМ от 1 А до 7 А с шагом 1 А для режима охлаждения, от 1 А до 3 А с шагом 0,5 А для режима нагрева. Задачей моделирования являлось определить минимальное (для режима охлаждения) и максимальное (для режима нагрева) значения температуры на холодных спаях ТЭМ. Для этого использовались функции Volume Goal Minimal Temperature и Volume Goal Maximal Temperature,

которые позволяют вывести конкретные значения температуры на контролируемом элементе сборки. Полученные в результате расчета значения представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета в системе FlowSimulation

Режим охлаждения		
Ток, А	Т холодного спая, °С	Т горячего спая, °С
1	5,87	20,11
2	-2,22	20,85
3	-7,43	22,51
4	-13,32	23,56
5	-15,44	24,97
6	-16,62	26,80
7	-17,13	27,49
Режим нагрева		
1	22,87	36,34
1,5	22,99	44,06
2	23,07	50,05
2,5	23,56	56,48
3	24,45	70,66

На основе моделирования были построены графики, отражающие изменение максимальных значений температуры горячего и холодного спая для двух режимов (рис. 3 – 4).

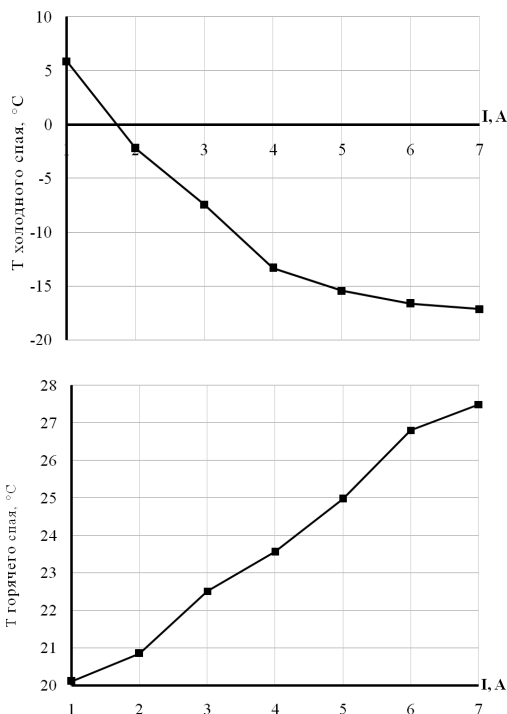


Рис. 3. Значения температур горячего и холодного спаев в режиме охлаждения спая при моделировании процесса термостабилизации

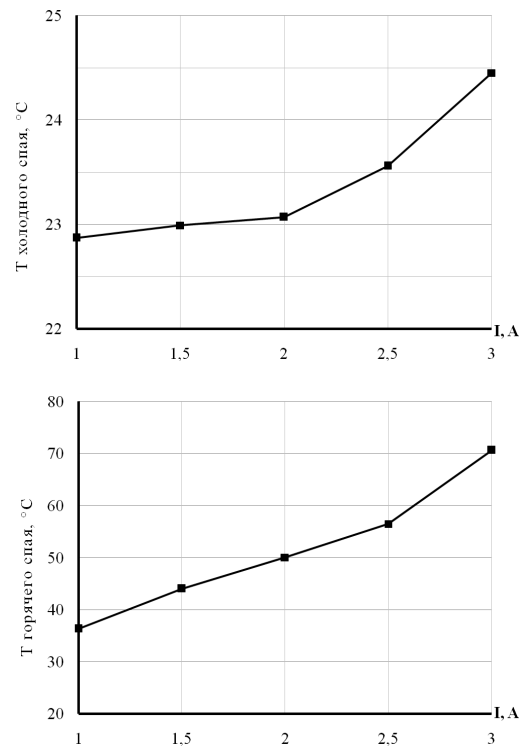


Рис. 4. Значения температур горячего и холодного спая при моделировании процесса термостабилизации в режиме нагрева

Заключение

Моделирование показало, что предлагаемая схема позволяет достичь предельной температуры при охлаждении – минус 17,13°С на обратном токе 7 А, при нагреве – плюс 70,66°С на прямом токе 3 А. Поскольку расчетная температура ФЭП, работающих на низких орбитах, лежит в пределах от минус 70 °С в момент выхода из тени до +60°С на освещенном участке, то разработанная модель не позволяет достичь соответствующей отрицательной температуры. Это связано с эффективностью как самого ТЭМ, так и эффективностью применяемого теплоотвода. Для получения указанного диапазона температур необходимо использовать ТЭМ с более высоким значением холодильной мощности, состоящий из двух и больше каскадов, так как многокаскадные ТЭМ имеют максимально достижимые значения холодопроизводительности 250-300 Вт [6], в комплексе с системой водяного охлаждения горячего спая. Это в несколько раз повысит эффективность системы и позволит проводить измерения характеристик ФЭП при температуре, соответствующей реальной рабочей температуре при эксплуатации в космосе.

Литература

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>. – 05.12.2010.

2. 28% Triple Junction GaAs Solar Cell [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.azurspace.com/images/pdfs/HNR_0002490-00-03.pdf. – 17.04.2012.

3. Triple-Junction Solar Cell for Space Apps [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.cesi.it/services/solar_cells/Documents/Cells_for_space_Apps.pdf. – 05.05.2011.

4. Полупроводниковые нетрадиционные источники энергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://edward.mpei.ac.ru/index.htm>. – 19.01.2014.

5. Алямовский, А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation [Текст] / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 464 с.

6. Шостаковский, П. Современные решения термоэлектрического охлаждения. Окончание [Текст] / П. Шостаковский // Компоненты и технологии. – 2010. – Вып. 1. – С. 130-137.

Поступила в редакцию 28.01.2014, рассмотрена на редколлегии 12.03.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. аэрокосмической теплотехники П. Г. Гакал, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЗАСТОСУВАННЯ

С. В. Губин, А. В. Гудкова, М. М. Наказненко

Запропоновано метод термоелектричної стабілізації температури при вимірюванні параметрів фотоелектричних перетворювачів в розширеному діапазоні температур для підвищення точності передпроектного моделювання сонячних батарей космічного призначення. Представлено виконавчий блок термостабілізатора, що розроблено для експериментального підтвердження можливості застосування запропонованого методу. Описано моделювання процесу термостабілізації в програмному модулі SolidWorks Flow Simulation. Проаналізовано отримані результати і зроблено висновки щодо необхідності подальшої доробки системи для досягнення необхідного діапазону температур.

Ключові слова: фотоперетворювач, теплові характеристики, термостабілізація, моделювання, модуль Пельтьє.

SIMULATION OF THERMAL STABILIZATION PROCESS FOR MEASUREMENT OF SOLAR CELL THERMAL CHARACTERISTICS

S. V. Gubin, A. V. Gudkova, M. N. Nakaznenko

Thermal stabilization method for measurement of solar cells parameters in wide temperature range is proposed. The method is intended for accuracy increasing during predevelopment analysis of space solar panels. Thermal stabilizing unit developed for experimental validation of the proposed method applicability is presented. Thermal stabilizing process simulation in SolidWorks Flow Simulation software is described. Obtained results are analyzed and appropriate conclusions as for the necessity of further system improvement for required temperatures achievement are made.

Key words: solar cell, thermal characteristics, thermal stabilization, simulation, Peltier module.

Губин Сергей Викторович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры ракетных двигателей и энергетических установок Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, e-mail: gubinsv@d4.khai.edu.

Гудкова Анна Витальевна – инженер отдела международных проектов и программ, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, e-mail: gudkovaanna@rambler.ru.

Наказненко Максим Николаевич – ассистент каф. ракетных двигателей и энергетических установок Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.