

УДК 621.311.21.001.4

Е.В. ЮРЕВИЧ, С.В. ГУБИН

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИЕМНИКА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ГОЛОГРАФИЧЕСКИМ КОНЦЕНТРАТОРОМ

Рассмотрен комбинированный приемник солнечного излучения, основы построения, принцип работы одного из вариантов. Приведено объяснение применения концентраторов солнечного излучения в приемниках солнечного излучения и обоснован выбор концентратора, применяемого в рассматриваемом приемнике. Предложено математическое описание для математического моделирования, в результате выполнения которого возможно получение энергетических характеристик как фотоэлектрической так и гелиоколлекторной составляющих. Сделаны выводы о преимуществах применения данного приемника в сфере электро- и теплоснабжения потребителя.

Ключевые слова: комбинированный гелиоприемник, фотоэлектрический модуль, гелиоколлектор, голографический концентратор, математическая модель.

Введение

Применение солнечных батарей является одним из наиболее перспективных решений электро- и теплоснабжения потребителя от возобновляемых источников энергии. Они могут быть установлены непосредственно на кровле здания, а могут образовывать целые солнечные электростанции. Солнечная энергия доступна в любой точке планеты и является экологически чистой. Фотоэлектрический метод преобразования солнечного излучения дает возможность получать электричество, а тепловой спектр солнечного излучения используется солнечными гелиоколлекторами для горячего водоснабжения и отопления. Особенностью фотоэлектрического метода является то, что преобразуется не весь спектр солнечного излучения, кроме того коэффициент полезного действия далек от совершенства, а с ростом температуры снижается эффективность преобразования. При этом стоимость фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) значительна.

Компенсировать часть этих недостатков можно путем концентрации солнечного излучения и уменьшением фотоактивной площади ФЭП. Однако при этом значительно повышается равновесная температура ФЭП. Данный избыток тепла может быть отведен дополнительной установкой гелиоколлектора, который обеспечит не только снижение температуры, но и создаст дополнительный нагрев теплоносителя для горячего водоснабжения и отопления.

Постановка задачи

Для повышения эффективности солнечных батарей предлагается применение комбинированного

гелиоприемника, в котором реализованы концентрация солнечного излучения, фотоэлектрическое преобразование и гелиоколлекторное нагревание воды.

Комбинированный гелиоприемник такого типа представляет собой единый блок преобразования солнечной энергии (рис. 1).

Принцип работы такого гелиоприемника основан на том, что видимая часть солнечного излучения многократно отражается от голографической пленки [1] и от внутренней стороны внешнего слоя поликарбоната в так называемом волноводе до тех пор, пока не попадет на фотопреобразователь [2], который преобразует это излучение в электричество. Голографическая пленка пропускает длинноволновое излучение, которое сразу попадает на абсорбер, в трубках которого нагревается рабочая жидкость. Теплопроводящая паста необходима для того, чтобы снизить сопротивление теплоотвода от нагретых фотоэлектрических преобразователей. Для уменьшения тепловых потерь от абсорбера во внешнюю среду, применяется теплоизоляция. Чтобы уплотнить монолитный поликарбонат в корпусе используется резиновая прокладка.

Основное функциональное назначение концентрирующих систем – повышение плотности потока солнечного излучения для его эффективного и более экономичного преобразования в необходимый вид энергии. Большинство существующих концентраторов солнечного излучения позволяют концентрировать практически весь спектр солнечного излучения в результате чего на фотоэлемент попадает как видимая часть, которая может быть преобразована в электричество, так и тепловая (инфракрасная (ИК)), которая повышает рабочую температуру фотоэле-

мента. Именно поэтому, в качестве концентратора предлагается использование трехмерной голограммы в виде тонкопленочного материала.

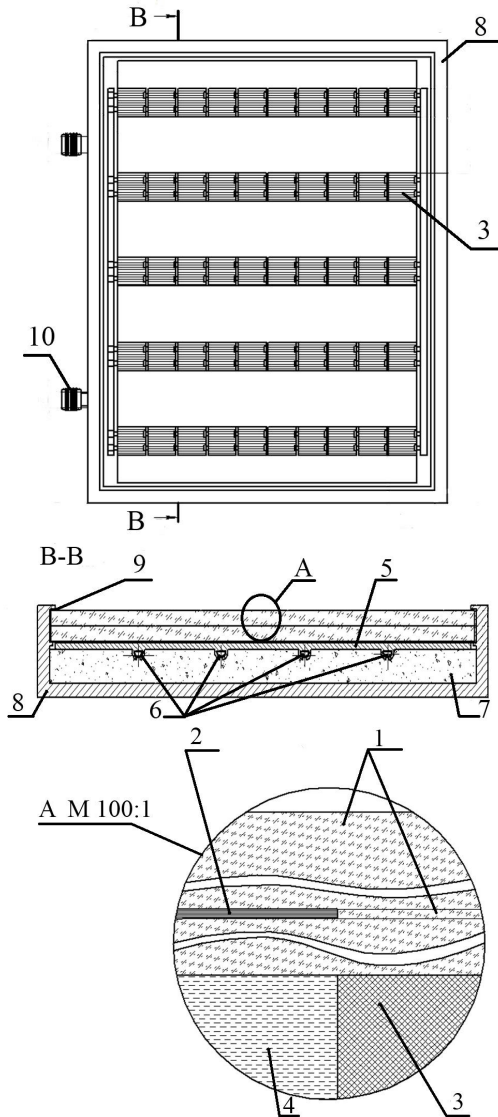


Рис. 1. Состав комбинированного гелиоприемника:
 1 - монолитный поликарбонат, 2 - концентратор солнечного излучения – голографическая пленка,
 3 – фотоэлемент, 4 - теплопроводящая паста,
 5 – абсорбер, 6 - трубы с теплопроводящей жидкостью, 7 – теплоизоляция, 8 – корпус,
 9 - резиновая прокладка, 10 - патрубки

Такая трехмерная голограмма работает следующим образом - при записи трехмерной объемной голограммы в массе фотоматериала образуется столько систем страт, сколько длин волн используется. В результате образуется настоящая совокупность страт $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$, переплетение которых соответствует локальным изменениям фаз «волн-объектов». Это голограмма Липпмана – Брэгга [5]. Независимость взаимодействия элементов страт со светом в качестве как выделяющих, так и складывающих фильтров приводит к тому, что при освещении голограммы светом длин волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$, возникают налагающиеся друг на друга монохроматические изображения. При освещении белым светом такой голограммы, каждая волна при определенном угле падения (угол Брэгга) отразится от «своей» системы страт.

Таким образом, задачу можно поставить как совместное математическое описание процессов концентрации, фотоэлектрического преобразования и теплоотвода.

Решение задачи

Основой математического моделирования процессов в фотоэлектрических батареях является описание вольт-амперной характеристики (ВАХ). Моделирование ВАХ батареи фотоэлектрической (БФ) выполняется на основе моделирования ВАХ ФЭП.

Для описания характеристик фотоэлемента применяется модель Шокли в основу которой положено уравнение поведения идеального диода в заданных условиях фототока [4] и температуры. В этом уравнении параметры $U_{xx}, I_{к.з.}, U_{opt}, I_{opt}, P_{max}$ могут определяться как на основе расчетов полупроводниковой структуры, так и на основе экспериментальных исследований.

Для тока нагрузки:

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

где: I_n – ток на нагрузку, А;

U_n – напряжение на нагрузку, В;

I_0 – обратный ток насыщения, А;

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

A_k – диодный коэффициент;

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

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

T – абсолютная температура СЭ, К;

R – последовательное сопротивление, Ом.

Представленная здесь модель отличается введением переменных:

Напряжение холостого хода при изменении температуры:

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

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

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

dUt – температурный коэффициент по напряжению, В;

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

Значение тока при различных температурах и освещенностях:

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

где $I_{\text{кз}} \cdot (E_{\text{ФЭП}} / E_0)$ – изменение тока короткого замыкания по освещенности;

dIt – температурный коэффициент по току;

$E_{\text{ФЭП}}$ – среднемесячное среднее дневное значение плотности солнечного излучения, поступающего на поверхность ФЭП, Вт/м²;

E_0 – значение освещенности при стандартных условиях, $E_0 = 1000$ Вт/м².

$$R_n = \frac{(U_{\text{опт}} + U_{\text{опт}} \cdot dUt \cdot [T_0 - T])}{\left(I_{\text{опт}} \cdot \left(\frac{E_{\text{ФЭП}}}{E_0} \right) \right) - I_{\text{опт}} \cdot dIt \cdot \left(\frac{E_{\text{ФЭП}}}{E_0} \right) \cdot (T_0 - T) \cdot r_d}, \quad (5)$$

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

$U_{\text{опт}}$ – напряжение в оптимальной точке, В;

Обратный ток насыщения является температурно зависимым:

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

Максимальная мощность:

$$P_{\text{max}} = U_{\text{опт}} \cdot I_{\text{опт}}, \quad (7)$$

Мощность модуля комбинированной солнечной энергоустановки:

$$P_m = E_{\text{ФЭП}} \cdot \eta \cdot N_{\text{ФЭП}} \cdot S_{\text{эл}}, \quad (8)$$

где $E_{\text{ФЭП}}$ – среднемесячное среднее дневное значение плотности солнечного излучения поступающего на поверхность ФЭП, Вт/м²;

η – к.п.д. фотопреобразователя;

$N_{\text{ФЭП}}$ – количество фотопреобразователей в модуле;

$S_{\text{эл}}$ – площадь фотоэлемента.

Количество солнечного излучения, поступающего на поверхность ФЭП:

$$E_{\text{ФЭП}} = E_0 + k_k \cdot E_{\text{п}}, \quad (9)$$

где k_k – коэффициент концентрации:

$$k_k = \frac{b_{\text{п}}}{b_{\text{ФЭП}}}, \quad (10)$$

где $E_{\text{п}}$ – количество солнечного излучения, поступающего на голографическую пленку и отраженно от нее, в результате чего по образовавшемуся волноводу между голографической пленкой и внешним слоем монолитного поликарбоната оно поступает на ФЭП;

$b_{\text{п}}$ – ширина голографической пленки;

$b_{\text{ФЭП}}$ – ширина фотопреобразователя.

Для описания гелиоколлектора используем уравнение теплового баланса абсорбера:

$$Q_k = F_{\text{из}} \cdot A \cdot (\eta_0 \cdot E_{\text{кол}} - K_m \cdot (t_{\text{ж.ср.}} - t_{\text{возд}})), \quad (11)$$

где $F_{\text{из}}$ – коэффициент изотермичности абсорбера теплового коллектора. Показывает насколько одинаковой или равномерной распределена температура по площади абсорбера теплового коллектора.

A – площадь тепловоспринимающей поверхности;

η_0 – оптический КПД коллектора;

τ_c – пропускная способность остекления коллектора;

α_c – поглощательная способность абсорбера;

$E_{\text{кол}}$ – количество солнечной энергии, поступающей на коллектор;

K_m – общий коэффициент теплопередачи от коллектора в окружающую среду;

$t_{\text{ж.ср.}}$ – средняя температура теплоносителя в коллекторе;

$t_{\text{возд}}$ – температура воздуха.

Количество излучения, которое поступает на гелиоколлектор:

$$E_{\text{кол}} = E_{\text{ФЭП}} - 0,19 \cdot E_{\text{ФЭП}} + (E_0 - 0,19 \cdot E_0). \quad (12)$$

При создании модели принято, что на начальном этапе концентратор описывается постоянным значением коэффициента концентрации, параметры которого могут варьироваться для различных технических решений в пределах известных длин волн солнечного излучения $k_k(\lambda_{\text{тр}})$.

Результаты решения

В результате проведения математического моделирования комбинированного приемника солнечного излучения, площадью 1 м² (площадь, занимаемая фотопреобразователями составляет 0,335 м²) были получены следующие значения: электрическая мощность приемника 190 Вт и тепловая – 2978 Дж. В результате выполнения математического моделирования были получены вольт-амперная (рис. 2) и вольт-ваттная (рис. 3) характеристики модуля.

График зависимости тепла, вырабатываемого коллектором, от температуры окружающей среды, представляет собой линейную зависимость.

При изменении температуры окружающей среды в пределах от 38 до 68°C количество тепла вырабатываемого коллектором варьируется от 2905 до 2978 Дж.

Выводы

Комбинированный гелиоприемник обладает рядом преимуществ перед другими: более эффективное использование солнечного излучения, поступающего на поверхность 1 м², отсутствие необходимости применения системы слежения за Солнцем.

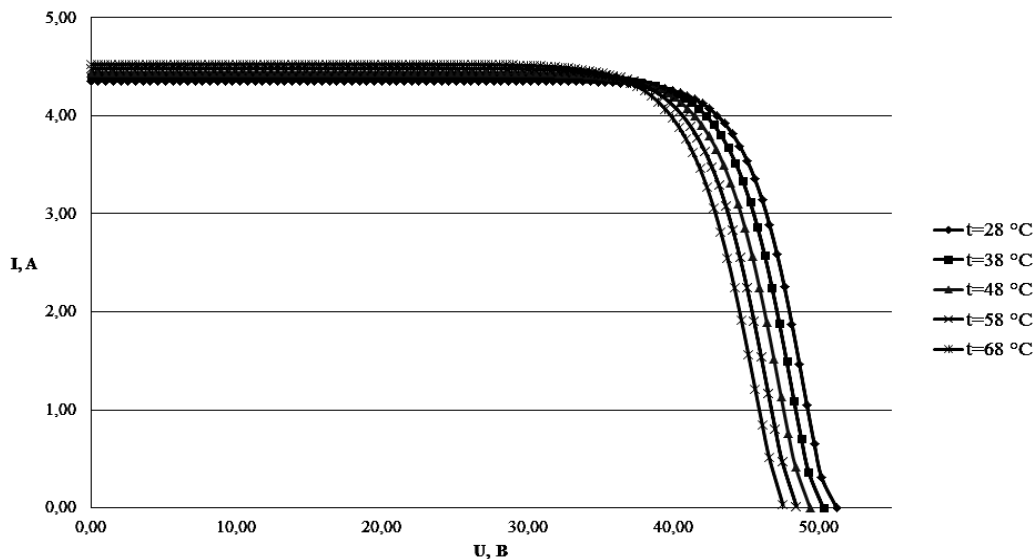


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика модуля комбинированного приемника при различной температуре окружающей среды

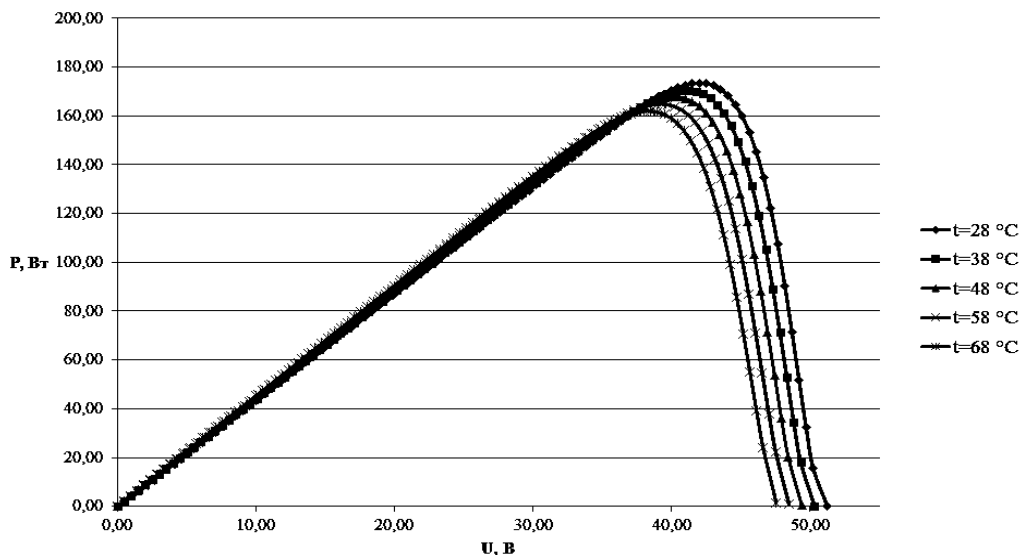


Рис. 3. Вольт-ваттная характеристика модуля комбинированного приемника при различной температуре окружающей среды

Однако сложность его создания заключается в сочетании противоречивых требований: в концентрации солнечной энергии, повышении равновесной температуры ФЭП, необходимости ее снижения за счет охлаждения гелиоколлектором, а также в необходимости одновременного повышения рабочей температуры гелиоколлектора для более эффективного нагрева рабочей жидкости. То есть необходимо найти некое оптимальное сочетание параметров степени концентрации и рабочей температуры при максимальной энергоотдаче ФЭП и эффективности гелиоколлектора. В первом приближении эта задача может быть решена с помощью представленной математической модели с введением ограничений по эффективности и стоимости. При этом область при-

менения комбинированного гелиоприемника значительно расширяется.

Этот приемник может применяться для «солнечных домов». С его помощью, в зависимости от сезона и от места расположения дома, можно либо полностью, либо частично обеспечить дом электричеством и теплом. При освещении установки Солнцем, электрический ток, поступающий от фотопреобразователей, заряжает большие электрохимические аккумуляторы [3]. В то же время тепло солнечного излучения передается от фотопреобразователей к алюминиевым листам, а от них – теплоносителю, протекающему в трубах. Горячая вода накапливается в резервуаре – большом водяном баке, который расположен под полом дома. Для работы установки

в холодное время года в контуре гелиоколлектора должна циркулировать незамерзающая жидкость (антифриз). Для этого в контур вводится теплообменник, установленный в баке – аккумуляторе, а сам контур герметизируется при повышенном давлении теплоносителя, что обеспечивает работу гелиоколлектора при более высоких температурах и надежно защищает потребителя от токсического влияния антифриза. Основной задачей комбинирования приемников солнечного излучения есть сохранение высоких выходных характеристик при минимальных затратах.

Таким образом, для создания методики расчета гелиоприемника комбинированного типа необходимо ввести математическое описание концентратора солнечного излучения и решить систему уравнений концентратор-фотоэлемент-абсорбер для определения оптимальной температуры при которой будет максимальная энергоотдача как фотоэлемента так и гелиоколлектора с ограничениями по степени концентрации.

Литература

1. Голографические солнечные батареи преобразуют свет перед потреблением [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.membrana.ru/articles/technic/2006/05/03/222900.html> – 3.05.2006г.
2. Products-Space-Cells-Single Junction Solar Cells-GaAs/Ge Single Junction Solar Cells [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.spectro-lab.com>. – 20.11.2009 г.
3. Безручко, К.В. Автономные наземные энергетические установки на возобновляемых источниках [Текст]: учеб. пособие / К.В. Безручко, С.В. Губин. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 300 с.
4. Бордина, Н.М. Моделирование вольт-амперных характеристик солнечных элементов и солнечных батарей [Текст] / Н.М. Бордина, В.А. Летин. -М.: Информэлектрон, 1986. -62 с.
5. Андреева, О.В. Прикладная голография [Текст]: учебн. пособие / О.В. Андреева. – СПб: СПбУИТМО, 2008. – 184 с.

Поступила в редакцию 29.09.2011

Рецензент: канд. техн. наук, начальник отдела А.М. Листратенко, Научно-исследовательский институт приборостроения, Харьков.

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КОМБІНОВАНОГО ПРИЙМАЧА СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З ГОЛОГРАФІЧНИМ КОНЦЕНТРАТОРОМ

О.В. Юревич, С.В. Губин

Розглянуто комбінований приймач сонячного випромінювання, основи побудови, принцип роботи одного з варіантів. Наведено пояснення застосування концентраторів сонячного випромінювання в приймачах сонячного випромінювання і обґрунтований вибір концентратора, що застосовується в даному приймачі. Запропоновано математичний опис для математичного моделювання, у результаті виконання якого можливе отримання енергетичних характеристик як фотоелектричної так і гелиоколлекторної складової. Зроблено висновки про переваги застосування даного приймача в сфері електро- і тепlopостачання споживача.

Ключові слова: комбінований гелиоприймач, фотоелектричний модуль, гелиоколлектор, голографічний концентратор, математична модель.

THE BUILDING OF THE MATHEMATICAL MODEL OF A SOLAR RADIATION COMBINED RECEIVER WITH THE HOLOGRAPHIC CONCENTRATOR

O. V. Iurevych, S. V. Gubin

In the present work a solar radiation receiver, its frameworks and the operation principle of the one of its variants were reviewed. Also in this work there is a review of the use of solar radiation concentrators in solar radiation receiver and the explanation of the choice of a concentrator used in the concerned receiver. There is a mathematical description for the mathematical modeling as a result of which it is possible to get energy characteristics of the photovoltaic components as well as solar collector components. This work contains the summary of the usage advantages of the present receiver in fields of electrical power and heat supply of the load.

Keywords: combined solar radiation receiver, photovoltaic module, solar collector, holographic concentrator, mathematical model.

Юревич Елена Валерьевна – аспирант кафедры ракетно-космических двигателей и энергетических установок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: yurevi.elena@yandex.ru.

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