



СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

SOLAR ENERGY

ФОТОЭЛЕМЕНТЫ. ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ.
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДУЛИ

PHOTOELECTRIC CELL. PHOTOVOLTAIC EFFECT
IN SEMICONDUCTOR STRUCTURES.
PHOTOELECTRIC MODULES

Статья поступила в редакцию 16.01.15. Ред. рег. № 2170

The article has entered in publishing office 16.01.15. Ed. reg. No. 2170

УДК 621.383

**ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ТЕПЛОФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ
С АСИММЕТРИЧНЫМ ПАРАБОЛОЦИЛИНДРИЧЕСКИМ
КОНЦЕНТРАТОРОМ И ФОТОПРИЕМНИКОМ НА ОСНОВЕ
МАТРИЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

В.А. Майоров, Л.Д. Сагинов, Д.С. Стребков

Всероссийский институт электрификации сельского хозяйства
Россия 109456, Москва, 1-й Вешняковский проезд, 2
тел.: (499)171-19-20; e-mail: viesh@dol.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.10-11.002

Заключение совета рецензентов: 18.02.15 Заключение совета экспертов: 16.03.15 Принято к публикации: 07.04.15

Разработка и создание теплофотоэлектрических модулей в настоящее время – одно из важнейших направлений развития солнечной энергетики. Целью этих работ является повышение эффективности преобразования солнечной энергии за счёт снижения потерь поступающей солнечной энергии и, в конечном счёте, снижение себестоимости получаемой энергии. В работе рассмотрены новые теплофотоэлектрические модули, включающие фотоприёмники и концентраторы, обеспечивающие эффективное преобразование солнечной энергии в тепловую и электрическую. Проведено математическое моделирование для создания алгоритма расчёта конструкции теплофотоэлектрического модуля с заданными энергетическими параметрами с применением законов геометрической оптики, фотоэнергетики, а также тепло- и массообмена. При использовании подобных модулей, в основе которых находится параболоцилиндрический концентратор и фотоприёмник с системой протока теплоносителя, возможно создание когенерационных установок для выработки электричества и тепла. Разработанные по такой методике образцы модулей исследуются на стендах и испытываются в натурных условиях. Солнечный модуль с асимметричным параболоцилиндрическим концентратором и площадью миделя $66 \times 70 \text{ см}^2$, с линейчатым фотоприёмником концентрированного излучения на базе матричных фотопреобразователей площадью $6 \times 68 \text{ см}^2$ с системой протока теплоносителя обеспечивает электрическую мощность более 27 Вт. Расчёт оптического КПД даёт значение 0,64, что для данной конструкции концентраторного модуля не является пределом; тем не менее сравнительная оценка количества фотоэлектрической энергии, поступающей от данного модуля и стандартной планарной солнечной батареи, даёт прирост на уровне 26 %. При увеличении же оптического КПД до 80 %, что вполне реально при имеющихся технологических запасах, этот прирост возрастает до 50 % и выше.

Ключевые слова: асимметричный параболоцилиндрический концентратор, солнечное излучение, линейчатый приёмник концентрированного излучения, матричный солнечный элемент (МСЭ), фотоэлектрическая вольт-амперная характеристика (ВАХ), оптический КПД концентраторного модуля, теплофотоэлектрический фотоприёмник.

PHOTOVOLTAIC FEATURES OF PV-T MODULE WITH ASYMMETRIC PARABOLIC-CYLINDRIC CONCENTRATOR AND PHOTORECEIVER ON THE BASIS OF MATRIX SOLAR CELLS

V.A. Majorov, L.D. Saginov, D.S. Strebkov

The All-Russian Research Institute for Electrification of Agriculture
2, 1-st Veshnyakovsky proezd, Moscow, 109456 Russia
ph.: (499)171-19-20; e-mail: viesh@dol.ru

Referred 18 February 2015 Received in revised form 16 March 2015 Accepted 07 April 2015

Design and development of photovoltaic-thermal (PV-T) modules is currently one of the important directions of solar energy application. These projects are aimed at increasing the effectiveness of solar energy conversion through combining electric and thermal energy generation in one device by decreasing solar energy losses and consequently decreasing energy generation costs. The paper discusses the new PV-T modules, including photoreceiver and solar illumination concentrator which provides efficient conversion of solar energy into heat and electricity. The mathematical modeling is used to create an algorithm for calculating of PV-T module design with the specified energy parameters. The laws of geometrical optics, photovoltaics, as well as heat and mass transfer are used. Such modules, based on a symmetrical parabolic-cylindrical concentrator and a photoreceiver with a coolant system flow may serve as a cogeneration installation for electricity and heat generation. Developed solar prototypes were investigated at testing ground and in field conditions with sun illumination. Solar module with asymmetric parabolic-cylindric concentrator with the midsection area $66 \times 70 \text{ cm}^2$ and concentrated radiation photoreceiver on the basis of $6 \times 68 \text{ cm}^2$ area matrix solar cells, with the flow coolant system provides 27 electrical powerwatts. The calculation of optic efficiency results in 0,64, which is not the limit for this concentrator module construction; and the comparison of photoelectric energy received from this module and a standard planar solar battery with the same area and equal effectiveness of photoconverters during the period between winter and summer solstice gives an increase of 26%. Increasing the optic efficiency up to 80%, which is realistic at current technologic reserves, this increase can reach 50%.

Keywords: asymmetric parabolic-cylindric concentrator, solar radiation, linear photoreceiver of concentrated radiation, matrix solar cell (MSC), PV current-voltage diagram, optical efficiency of concentrator module, PV-T photoreceiver.



Майоров Владимир
Александрович
Vladimir A. Majorov

Сведения об авторе: канд. техн. наук, заведующий лабораторией солнечных концентраторных систем и нетрадиционных источников энергии Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства.

Образование: факультет автоматики и радиоэлектроники Всесоюзного заочного политехнического института (1979), Московский физико-технический институт (1985).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, гелиотехника, теплофизика, теплотехника.

Публикации: 87, из них 15 свидетельств на изобретения СССР и патентов РФ.

– РИНЦ: 33, 48 цитирований, индекс Хирша 1, SPIN 1183-0275;

– Scopus: 4 публикации, 1 цитирование.

Information about the author: PhD (engineering), the Head of the Laboratory of Solar Concentrator Systems and Unconventional Energy Sources of The All-Russian Scientific-Research Institute for Electrification of Agriculture

Education: the Automatics and Radioelectronics department of the All-Union Correspondence Polytechnic Institute (1979), Moscow Physical-Technical Institute (1985)

Research area: renewable energy sources, heliotechnics, heating physics, heating engineering.

Publications: 87, including 15 patents;

– Russian Scientific Citation Index:

33 publications, 48 citations, h-index 1, SPIN 1677-3738.

– Scopus: 4 publications, 1 citation.



Сагинов Леонид
Дмитриевич
Leonid D. Saginov

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, заведующий отделом возобновляемых источников энергии Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства. Почетный машиностроитель (2006 г.)

Образование: факультет физической и квантовой электроники Московского физико-технического института (1973).

Область научных интересов: спектроскопия и фотоэлектрические явления в полупроводниках, фотопреобразователи и фотоэнергетика, фотоприемники инфракрасного диапазона спектра, тепловидение.

Публикации: 132, из них 14 свидетельств на изобретения СССР и патентов РФ.

– РИНЦ: 63 публикации, 158 цитирований, индекс Хирша 6, средневзвешенный импакт-фактор журналов, в которых опубликованы работы 0,263; SPIN 1677-3738;

– Scopus: 22 публикации, 18 цитирований, индекс Хирша 3.

Information about the author: PhD (physics and mathematics), the Head of Renewable Energy Sources department of The All-Russian Scientific-Research Institute for Electrification of Agriculture.

Education: Moscow Physical-Technical Institute (1973).

Research area: spectroscopy and photoelectric phenomena in semiconductors, PV cells and modules, infrared photodetectors, thermovision.

Publications: 132, including 14 patents.

– Russian Scientific Citation Index: 63 publications, 158 citations, h-index 6, average impact factor of the journals where articles were published 0,263; SPIN 1677-3738;

– Scopus: 22 publications, 18 citations, h-index 3.



Стребков Дмитрий
Семенович
Dmitry S. Strebkov

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, директор Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ) с 1987 г. по настоящее время; заведующий кафедрой МГАУ и ЮНЕСКО, член-корреспондент ВАСХНИЛ, РАСХН (1991); академик РАСХН (1997), академик РАН (2013). Заслуженный деятель науки РФ (2008); председатель Российской Секции Международного общества по солнечной энергии с 1992 года; заместитель председателя Российского комитета по использованию возобновляемых источников энергии с 2002 года.

Руководитель рабочей группы Европейского бюро ЮНЕСКО по образованию в области солнечной энергетики.

Образование: факультет электрификации Московского института механизации и электрификации сельского хозяйства (1959) и вечернее отделение Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по специальности «Математика» (1967).

Область научных интересов: исследования и разработки в области электрификации сельскохозяйственных территорий и производств; возобновляемая энергетика.

Публикации: более 1 400 из них более 450 авторских свидетельств на изобретения СССР и патенты РФ, в том числе 60 зарубежных.

– РИНЦ: 441 публикация, 1 184 цитирования, индекс Хирша 10, SPIN2864-5630;

– Scopus: 63 публикации, 42 цитирования, индекс Хирша 3.

Information about the author: DSc (engineering), professor, director of The All-Russian Scientific-Research Institute for Electrification of Agriculture (VIESH). In 1985 he received the academic status of professor at the All-Union Correspondence Polytechnic Institute, became a corresponding member of the Lenin All-Union Academy of Agricultural Sciences and of the Russian Academy of Agricultural Sciences (1991), an academician of the Russian Academy of Agricultural Sciences in 1997 and Russian Academy of Sciences (2013). Since 1992, he is the Chairman of the Russian Section of the International Solar Energy Society, Vice-President of the Russian Committee on the Use of Renewable Energy Sources (2002) and the Head of the Working Group of the European UNESCO Bureau on education in the field of solar energy.

Education: Moscow Institute of Agriculture Mechanization and Electrification (now Moscow State Agricultural Engineering University), faculty of Electrification (1959), Evening Department of the Lomonosov Moscow State University, faculty of Mechanics and Mathematics, specialty "Mathematics" (1967).

Research area: electrification of agriculture, as well as in the field of renewable energy.

Publications: more than 1400, including more than 450 patents, and 16 USA patents.

– Russian Scientific Citation Index: 441 publications, 1184 citations, h-index 10; SPIN2864-5630;

– Scopus: 63 publications, 42 citations, h-index 3.



Введение

Разработка и создание теплофотоэлектрических модулей (photovoltaic-thermal, PV-T modules) является одним из важнейших направлений развития солнечной энергетики [1]. Это обусловлено очевидной необходимостью повышения эффективности преобразования солнечной энергии, в данном случае путём получения как электрической, так и тепловой энергии в одном устройстве за счёт снижения потерь поступающей солнечной энергии и снижения себестоимости получаемой энергии. В настоящей работе этот эффект достигается с помощью теплофотоэлектрического устройства на основе матричных солнечных элементов (МСЭ, Vertical Multi-junction Photovoltaic Cell) в конструкции с асимметричным парабоцилиндрическим концентратором солнечного излучения. Преимущества использования концентраторов при фотоэлектрическом преобразовании солнечного излучения хорошо известны [2] – фактическая замена дешёвыми зеркальными отражателями различной формы более дорогих фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). При этом, однако, нужно сохранить эффективность фотоэлектрического преобразования концентрированного солнечного излучения. Другие проблемы, с которыми сталкиваются при использовании планарных кремниевых фотоэлектрических преобразователей:

- снижение КПД планарных кремниевых ФЭП при высоких концентрациях солнечного излучения;
- низкие напряжения на одном планарном ФЭП (~0,5 В) приводят к необходимости последовательной коммутации большого числа ФЭП в солнечном фотоэлектрическом модуле для получения напряжения 12 В и выше, приемлемого для дальнейшего использования в электрических аккумуляторах, инверторах и т.п., однако последовательная коммутация большого числа ФЭП уменьшает надёжность системы, так как выход из строя одного элемента цепи приводит к отказу всей цепи.

В число актуальных задач входят: обеспечение работы солнечного фотоэлектрического модуля при высоких концентрациях и равномерного освещения фотоприемника; получение на одном ФЭП (модуле) технически приемлемого напряжения (12В и выше); повышение эффективности преобразования и снижение стоимости вырабатываемой энергии. Здесь значительные возможности даёт использование МСЭ [3], отличительными особенностями которых являются:

- получение высокого напряжения (до 15–18 вольт на сантиметр) на кремниевых элементах, изготавливаемых по групповой полупроводниковой технологии;
- снижение требований по однородности светового потока в системах с концентрацией излучения;
- повышение КПД МСЭ-фотопреобразователей с увеличением степени концентрации солнечного излучения.

Целью работы является исследование фотоэлектрических характеристик солнечного модуля с линейчатый фотоприемником на основе МСЭ и асимметричным парабоцилиндрическим концентратором солнечного излучения.

Результаты и их обсуждение

Разработка нового фотоэлектрического модуля проводится на основе методики математического моделирования функционирования отдельных блоков с использованием законов геометрической оптики, фотоэлектрических характеристик МСЭ для получения фотоэнергетических характеристик модуля. Разработанные по такой методике образцы исследуются на соответствующих стендах и испытываются в натуральных условиях.

Схема конструкции теплофотоэлектрического модуля с асимметричным парабоцилиндрическим концентратором и фотоприемником на основе матричных солнечных элементов представлена на рис. 1.

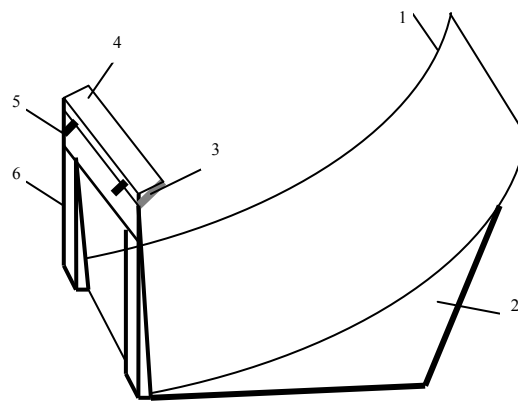


Рис. 1. Схема конструкции фотоэлектрического модуля с асимметричным парабоцилиндрическим концентратором: 1 – концентратор; 2 – стойки крепления концентратора; 3 – линейчатый фотоэлектрический приемник с солнечными элементами; 4 – устройство протока теплоносителя; 5 – штуцера для входа и выхода теплоносителя; 6 – опорные стойки фотоприемника

Fig. 1. Photovoltaic module construction scheme with asymmetric parabolic-cylindric concentrator:

1 – concentrator; 2 – concentrator mounting rack; 3 – linear photoreceiver with solar cells; 4 – heat transfer agent flow device; 5 – inlet and outlet heat transfer agent connecting pipes; 6 – photoreceiver supporting racks

Фотоэлектрический модуль включает асимметричный парабоцилиндрический концентратор с миделем размером $R \times L$ (L – длина цилиндрической оси, R – ширина концентратора); линейчатый фотоприемник, выполненный из сккоммутированных параллельно-последовательно МСЭ шириной d , закрепленных на устройстве охлаждения и установленных в фокальной области концентратора.

Схема хода лучей в модуле от поверхности концентратора до поверхности планарного фотоприемника шириной d представлена на рис. 2.

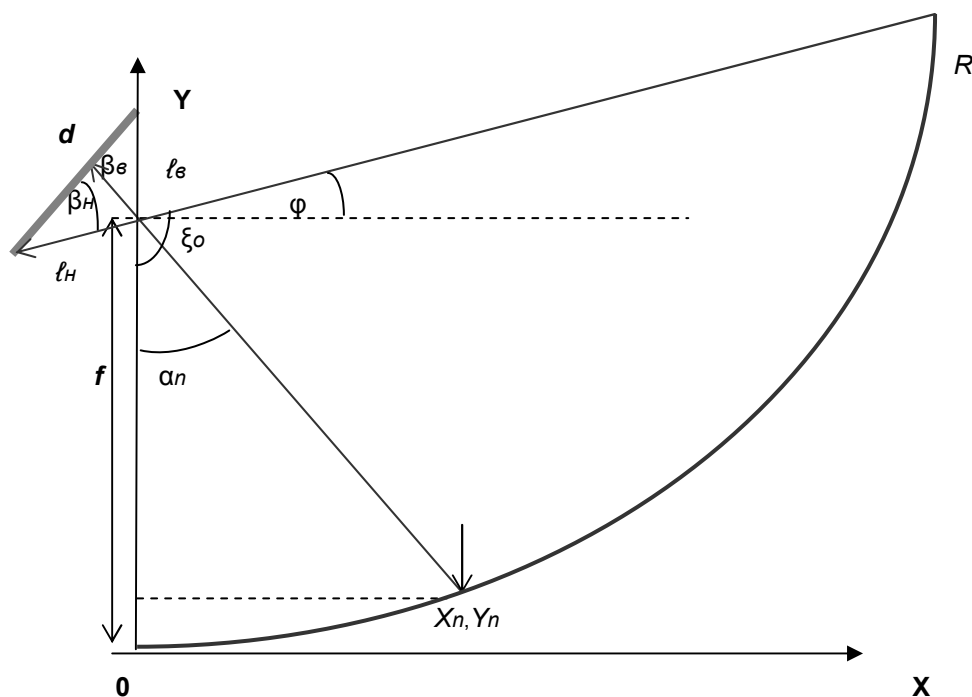


Рис. 2. Схема хода лучей в модуле
Fig. 2 Diagram of ray tracking in module

На рис. 2 введены следующие обозначения: f – фокусное расстояние параболы; α_n – угол между осью ординат и отрезком, соединяющим соответствующие интервалы фотоприёмника и параболы; ξ_0 – угол между координатной осью OY и отрезком, соединяющим крайние точки параболы с координатами $\{Y_a, R\}$ и фотоприёмника $\{X_n, Y_n\}$; β_n – угол между плоскостью фотоприёмника и отрезком с координатами $\{Y_a, R\}$; β_v – угол между плоскостью фотоприёмника и осью ординат; φ – угол между отрезком с координатами $\{Y_a, R\}$ и $\{X_n, Y_n\}$ и прямой $Y=f$, параллельной оси абсцисс; l_n и l_v – отрезки, соединяющие фокус с нижним и верхним краем фотоприёмника соответственно (рассчитываются по нижеприведённым формулам); значения параметров f , β_v , K_r (коэффициент геометрической концентрации) устанавливаются исходя из граничных условий, определяемых габаритами модуля.

Исходя из условий компактности многомодульной конструкции солнечной установки, работающей с минимальными потерями падающего солнечного излучения, верхний уровень фотоприёмника должен находиться примерно на одном уровне с верхним краем концентратора, располагаться за фокусом, находясь с ним и нижним краем концентратора (вершина параболы) на одной оси.

Конструктивные параметры модуля определяются системой уравнений соответствующих условию как можно более равномерной освещённости поверхности фотоэлектрического приёмника, выполненного в виде линейки шириной d из коммутированных ФЭП и расположенного под углом к миделю

концентратора с параболической формой отражающей поверхности $Y(X)$:

$$X^2 = 4fY, \quad X_n = (f - Y_n) / \operatorname{tg} \alpha_n, \quad d_n = l_v \sin \alpha_n / \sin(\alpha_n + \beta_v), \quad \xi_0 = \pi/2 + \varphi, \quad X_n = d \sin \beta_v, \quad Y_n = f - X_n \operatorname{tg} \varphi, \quad l_v = d \sin \beta_v / \sin \xi_0, \quad X_v = 0, \quad Y_v = Y_n + d \cos \beta_v, \quad l_n = d \sin \beta_v / \sin \xi_0, \quad Y_a = R^2 / 4f, \quad K_r = R / d.$$

Для проведения расчётов абсцисса элементов параболы делится на N интервалов с координатами $X_1 \dots X_N$ ($0 < X < R$), с однородной освещённостью падающего излучения в каждом из отрезков $X_{n+1} - X_n$ ($1 < n < N$). В силу однозначного соответствия, отражаемое концентрированное излучение будет попадать в соответствующие интервалы $d_{n+1} - d_n$ вдоль ширины d фотоприёмника.

Геометрическая концентрация освещённости фотоэлектрического приёмника K_n в интервалах координатных значений концентратора $X_{n+1} - X_n$ и в интервалах координатных значений фотоприёмника ($d_{n+1} - d_n$)

$$K_n = (X_{n+1} - X_n) / (d_{n+1} - d_n). \quad (1)$$

С учётом данных формул проведен расчет профиля модуля, на основании которого вычерчены лекала для изготовления концентратора и модуля в целом.

Обеспечение оптимальной работы солнечного фотоэлектрического модуля достигается оптимиза-

цией конструктивных параметров модуля (фотоприемника и концентратора) при необходимых значениях концентрации и равномерности освещения фотоприемника, при которых могут быть получены заданные эксплуатационные фотоэнергетические параметры разрабатываемой установки.

С целью увеличения выработки электроэнергии

модуль закреплен на опоре с устройством слежения за Солнцем, т.е. солнечное излучение всегда падает по нормали к миделю концентратора.

На рис. 3 представлена форма профиля модуля с фотоприемником шириной $d = 6$ см и параболоцилиндрическим концентратором с шириной миделя $R = 66$ см.

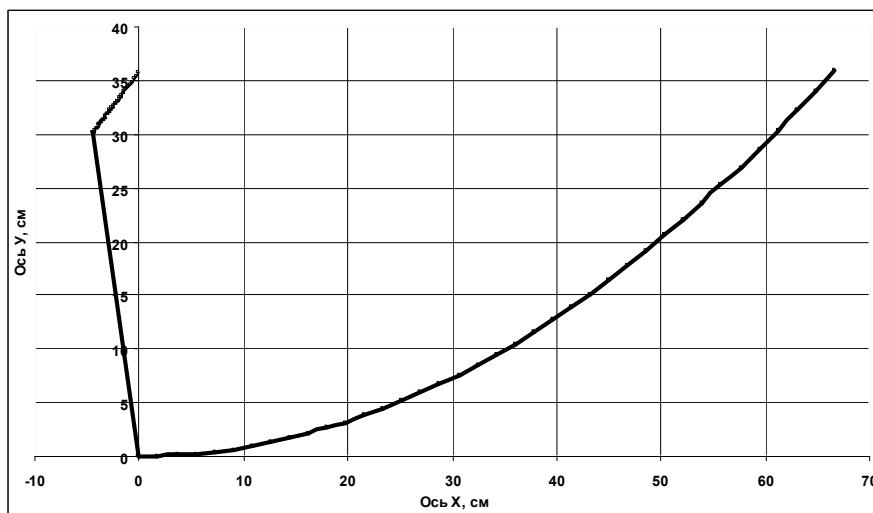


Рис. 3. Форма профиля модуля с фотоприемником шириной $d = 6$ см и параболоцилиндрическим концентратором с шириной миделя $R = 66$ см

Fig. 3. Photoreceiver module profile with width $d = 6$ cm and the parabolic-cylindric concentrator with the width of the midsection area $R = 66$ cm

На рис. 4 показан график распределения концентрации освещенности на поверхности линейчатого фотоэлектрического приемника от ширины фокальной области (от 0 до d).



Рис. 4. Распределение концентрации излучения на поверхности линейчатого фотоприемника в зависимости от ширины фокальной области (от 0 до d)

Fig. 4. The concentration distribution of the radiation on the photoreceiver surface depending on the focal region width (0 to d)

Изменение концентрации излучения на фотоприемнике достигается посредством уменьшения его ширины при соответствующем изменении профиля концентратора и/или положения фотоприемника. Следовательно, можно изменять концентрацию излучения фотоэлектрического приемника, не меняя га-

баритных размеров концентратора и выбранного типа фотоэлектрических преобразователей.

Из приведенных характеристик видно, что изменение концентрации излучения по ширине фокальной области теплофотоэлектрического приемника не превышает $\pm 20\%$ и не влияет на электрофизические

и тепловые характеристики солнечного модуля.

Таким образом, на основании приведенной расчетной модели и графиков распределения концентрации по рабочей поверхности линейчатого фотоприемника можно оптимизировать габаритные размеры блоков модуля, величину концентрации и распределение освещенности на рабочих поверхностях фотоприемника.

В соответствии с формулой (2) можно рассчитать выработку энергии W солнечной батареи (СБ) [4]:

$$W = E_o \eta_{\text{опт}} \cos j_{\text{ср}} S \tau, \quad (2)$$

где E_o – солнечная освещенность, $\eta_{\text{опт}}$ – оптический

КПД солнечной батареи; $\cos j_{\text{ср}}$ – средняя дневная величина $\cos j$ в пределах значений $j_{\text{мин}}$ и $j_{\text{макс}}$ (j – угол наклона солнечного излучения к нормали миделя СБ); S – площадь миделя СБ; τ – дневное время работы СБ.

На рис. 5 представлены сравнительные расчетные характеристики выработки электроэнергии (без учета прозрачности атмосферы) модуля планарной СБ, работающего в стационарном режиме, площадью 3 м^2 с КПД фотопреобразователей 15 % и модуля СБ, работающего в режиме слежения за Солнцем с концентратором и площадью миделя 3 м^2 коэффициентом отражения $\eta_{\text{отр}} = 0,8$, КПД фотопреобразователей 15 % (широта местности $56,5^\circ$).

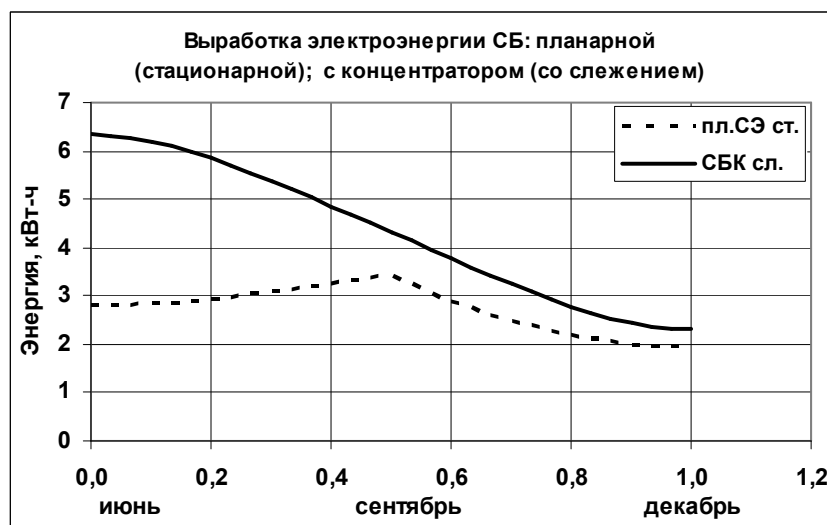


Рис. 5. Расчетные характеристики выработки электроэнергии модуля планарной СБ площадью 3 м^2 и $\eta_{\text{фп}} = 15 \%$ в стационарном режиме работы и модуля СБ с концентратором с площадью миделя 3 м^2 , $\eta_{\text{отр}} = 0,8$, $\eta_{\text{фп}} = 15 \%$, со слежением, широта $56,5^\circ$

Fig. 5. Design characteristics of PV planar unit power generation with area of 3 m^2 and PV cell efficiency 15 % in steady-state operation and of the PV concentration module with an midsection area of 3 m^2 , reflection efficiency 0.8, PV cell efficiency 15 % and tracking, latitude $56,5^\circ$

Приведенные характеристики показывают, что концентраторные СБ в режиме слежения за Солнцем могут увеличить годовую выработку электроэнергии до полутора раз. Однако следует отметить, что целесообразнее применять модули солнечных батарей с концентраторами меньших размеров, так как в этом случае:

- снижается количество дефицитных матричных фотоэлектрических преобразователей;
- концентраторы можно изготавливать из тонких листов алюминия (0,3–0,5 мм) с зеркальной рабочей поверхностью;
- снижаются требования по точности слежения за Солнцем;
- уменьшаются процессы деформации конструкции в целом;
- менее трудоемки процессы сборки, юстировки, замены вышедших из строя модулей, их ремонт.

На базе разработанных математических моделей расчета оптико-энергетических параметров солнечных модулей с асимметричным параболоцилиндрическим концентратором изготовлен макетный образец солнечного модуля с габаритными размерами (66x70x35) см на основе линейчатого фотоприемника с системой водяного охлаждения, на котором закреплены высоковольтные матричные кремниевые элементы размером 6x3,5 см в количестве 19 шт с параллельным электрическим соединением. Параболоцилиндрический концентратор на основе тонкого листа алюминия Alanod толщиной 0,3 мм со светоотражающим покрытием с коэффициентом отражения рабочей поверхности 0,8 закреплен посредством ребер жесткости на стойках, изготовленных с применением лекал.

Солнечный модуль с параболоцилиндрическим концентратором, линейчатым фотоприемником и системой водяного охлаждения представлен на рис. 6.



Рис. 6. Солнечный модуль с асимметричным параболоцилиндрическим концентратором, линейчатый фотоприёмник и системой водяного охлаждения
Fig. 6. PV module with asymmetric parabolic-cylindric concentrator, linear photoreceiver and water cooling system

На экспериментальном полигоне ФГБНУ ВИЭСХ (г. Москва) проведены натурные испытания изготовленного образца линейчатого фотоприёмника на основе МСЭ и модуля концентраторной СБ.

При исследовании характеристик концентраторного параболоцилиндрического модуля использовались: пиранометр «ПЕЛЕНГ СФ-06», быстродействующие платы АЦП, вольт-амперметры, регулятор сопротивления, термометры и др. приборы для измерения фотоэлектрических характеристик разработанных на экспериментальном полигоне устройств.

При измерении фотоэлектрических вольт-амперных характеристик (ВАХ) с ориентацией фотоприёмника перпендикулярно солнечным лучам параметры ВАХ регистрировались от режима холостого хода до режима короткого замыкания за счет изменения сопротивления нагрузки (интенсивность суммарной радиации определяют в начале и по окончании измерений). Точность измеряемых характеристик и параметров (с учётом точности приборов и разрядности АЦП) была не ниже 4%.

На рис. 7 показана ВАХ линейчатого фотоприёмника на основе МСЭ размером 6х68 см² для параболоцилиндрического концентратора, полученная при натурном солнечном облучении с освещённостью 866 Вт/м² без использования концентратора.

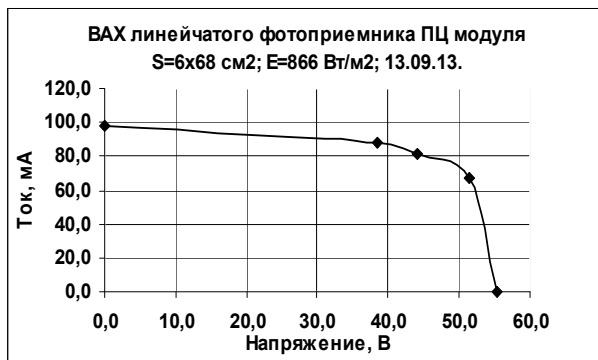


Рис. 7. ВАХ фотоприёмника при солнечной освещенности $E = 866 \text{ Вт/м}^2$

Fig. 7. Current-voltage diagram of photoreceiver with sunlight illumination $E = 866 \text{ W / m}^2$

Как видно на рис. 7, фотоприёмник показал рабочее напряжение 44 В, вырабатываемый ток 0,081 А, коэффициент заполнения ВАХ $FF = 0,659$ и электрическую мощность 3,6 Вт.

На рис. 8 представлена экспериментальная ВАХ, измеренная при натурном солнце, модуля СБ с параболоцилиндрическим концентратором и фотоприёмником, ВАХ которого показана на рис. 7.

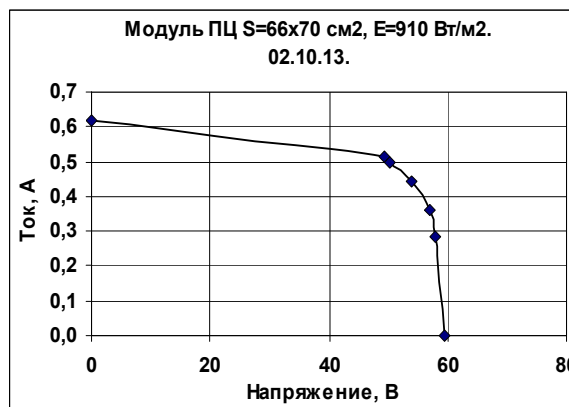


Рис. 8. ВАХ концентраторной СБ при солнечной освещенности $E = 910 \text{ Вт/м}^2$

Fig. 8. Current-voltage diagram of parabolic-cylindric concentrator module with sunlight illumination $E = 910 \text{ W/m}^2$

Проведенные натурные испытания солнечного модуля подтвердили соответствие заданным техническим параметрам: рабочее напряжение модуля ~ 50 В, вырабатываемый ток более 0,5 А, коэффициент заполнения ВАХ $FF = 0,705$ и электрическая мощность образца выше 27 Вт при пересчете на освещённость 1 000 Вт/м².

Оптический КПД модуля $\eta_{\text{опт}}$ определяется из соотношения: $\eta_{\text{опт}} = (J_{\text{СБК}}/J_{\text{фп}})/K_{\text{г}}$, где $J_{\text{СБК}}$ – ток короткого замыкания СБ с концентратором; $J_{\text{фп}}$ – ток короткого замыкания фотоприёмника при той же освещенности, приходящей на мидель концентратора; $K_{\text{г}}$ – геометрическая концентрация модуля, равная отношению площади миделя концентратора к площади фотоприёмника. На основании приведенных на рис. 7 и рис. 8 ВАХ оптический КПД модуля составляет $\eta_{\text{опт}} = 0,64$.

В соответствии с формулой (2) и расчетными характеристиками выработки энергии стандартными планарными СБ и СБ с концентраторами в течение года для широты местности $\varphi = 56,5^\circ$, показанными на рис. 4, в таблице 1 приведены параметры отношения годовой выработки энергии $W_{\text{к}}$ СБ с концентратором (работающей в режиме слежения за солнцем) к годовой выработке энергии планарной СБ $W_{\text{пл}}$ (работающей в стационарном режиме с углом наклона к горизонту оптимизированным по широте местности) в зависимости от оптического КПД $\eta_{\text{опт}}$ СБ с концентратором.

Таблица 1
Зависимость отношения $W_k/W_{пл}$ от оптического КПД $\eta_{опт}$
для широты местности $\varphi = 56,5^\circ$

Table 1
The ratio dependence $W_k/W_{пл}$ on the optical efficiency $\eta_{опт}$
for latitude $\varphi = 56.5^\circ$

$\eta_{опт}$	0,9	0,8	0,7	0,64	0,55
$W_k/W_{пл}$	1,77	1,57	1,38	1,26	1,08

Из таблицы видно, что для широты местности $\varphi = 56,5^\circ$ годовая выработка энергии модуля СБ с концентратором W_k , работающим в режиме слежения за солнцем и при оптическом КПД модуля $\eta_{опт} = 0,64$, на 26 % выше годовой выработки энергии стандартной планарной СБ $W_{пл}$, работающей в стационарном режиме. Снижение себестоимости вырабатываемой модулем энергии примерно обратно пропорционально повышению выработки электро-энергии. При увеличении оптического КПД модуля за счет технологического усовершенствования конструкции концентратора до $\eta_{опт} = 0,8$ выработка энергии модуля увеличится по сравнению с планарным модулем более чем в полтора раза.

Заключение

Разработанные математические модели расчета оптико-энергетических параметров солнечных модулей с асимметричным параболическим концентратором и фотоприёмником на основе МСЭ адекватно отражают реальные параметры функционирования изготовленных солнечных модулей СБ. Проведенные натурные испытания солнечного модуля подтвердили соответствие заданным техническим параметрам: рабочее напряжение модуля соответствует ~ 50 В, вырабатываемый ток более 0,5 А и электрическая мощность макетного образца при 1 000 Вт/м² выше 27 Вт, при этом коэффициент заполнения ВАХ МСЭ увеличился с 0,659 при однократном солнце до 0,705 при концентрированном излучении, что подтверждает эффективность их использования в концентраторных СБ.

При увеличении оптического КПД модуля за счет технологического усовершенствования конструкции концентратора до $\eta_{опт} = 0,8$ выработка энергии модуля увеличится на 57 % в режиме слежения за Солнцем, что приведёт к снижению себестоимости вырабатываемой фотоэлектрической энергии.

Список литературы

1. PV-T Collector Development: Providing a structure beyond the collector <http://www.ises.org/index.php?id=246> // Режим доступа 10.12.2014г.
2. Стребков. Д.С., Тверьянович Э.В. Концентраторы солнечного излучения. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007.
3. Стребков Д.С., Арбузов Ю.Д., Евдокимов В.М., Майоров В.А., Поляков В.И., Сагинов Л.Д. Солнечные концентраторные модули с матричными солнечными элементами // Труды IX-й Международной конференции «Возобновляемая и малая энергетика-2012». М.: Россия, 2012.
4. Майоров В.А. Исследование среднегодовой выработки энергии солнечных батарей с параболическими концентраторами // Материалы 6-й Международной научно-практической конференции «Экология и сельскохозяйственная техника». С-Петербург: Россия, 2009. Т. 3. С. 169–173.

References

1. PV-T Collector Development: Providing a structure beyond the collector. Available at: <http://www.ises.org/index.php?id=246> (10.12.2014) (in Eng.).
2. Strebkov D.S., Tver'yanovich È.V. Koncentratory solnečnogo izlučeniâ, Moscow: GNU VIÈSH Publ., 2007 (in Russ.).
3. Strebkov D.S., Arbuzov Yu.D., Evdokimov V.M., Majorov V.A., Polyakov V.I., Saginov L.D. Solnečnye koncentratornye moduli s matričnymi solnečnymi elementami. *Works of IXth International Conference "Vozobnovlâemaâ i malaâ ènergetika-2012"*, Moscow, Russian Federation, 2012 (in Russ.).
4. Majorov V.A. Issledovanie srednegodovoj vyrobki ènergii solnečnyh batarej s parabolocilindričeskimi koncentratorami. *Materialy 6th International Scientific and Practical Conference «Èkologiâ i sel'skhozâjstvennaâ tehnikâ»*, St. Petersburg, Russian Federation, 2009, vol. 3, pp. 169–173 (in Russ.).

Транслитерация по ISO 9:1995

