

Н.И. СЛИПЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук, проф., ХНУРЭ, Харьков
В.А. ПИСЬМЕНЕЦКИЙ, канд.техн. наук, проф. ХНУРЭ, Харьков
А.В. ФРОЛОВ, канд.техн. наук, снс, ХНУРЭ, Харьков
Н.В. ГЕРАСИМЕНКО, асп., ХНУРЭ, Харьков
А.А. КИРИЛЮК, стажер-иссл., ХНУРЭ, Харьков
А.Н. ДЗЮБА, НТУ «КПИ», Киев
И.В. ЗВЕРШХОВСКИЙ, студ., НТУ «КПИ», Киев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ KV 150/24(12) В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ

Наведено результати експериментальних досліджень вихідних параметрів сонячної панелі KV 150/24(12): напруги U_{xx} , струму $I_{kз}$, вихідної потужності із врахуванням освітленості і температури в зимових умовах в межах світлового дня.

Ключові слова: сонячна панель, квантовий вихід, освітленість, вихідна потужність.

Приведены результаты экспериментальных исследований выходных параметров солнечной панели KV 150/24(12): напряжения U_{xx} , тока $I_{кз}$, выходной мощности с учетом освещенности и температуры в зимних условиях в пределах светового дня. Кроме этого выполнены оценки температурных коэффициентов напряжения U_{xx} и тока $I_{кз}$.

Ключевые слова: солнечная панель, квантовый выход, освещенность, выходная мощность.

The results of experimental research of solar panel KV 150/24(12) output parameters (open circuit voltage V_{oc} , short-circuit current I_{sc} and output power) taking into account illumination intensity and temperature during the daytime in winter conditions are presented.

Keywords: solar panel, quantum yield, illumination intensity, output power.

Введение

В современных условиях солнечные элементы являются долговечными, экологически чистыми и энергетически сбалансированными альтернативными источниками энергии.

Альтернативные источники электроэнергии на основе солнечных батарей (СБ) начинают активно внедряться в городские системы коммунального хозяйства, охранные системы, базовые станции мобильной связи и т.д.

В современных условиях 90% солнечных модулей создаются на базе кремниевых монокристаллических структур. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию режимов работы солнечной станции на основе кремниевых монокристаллических панелей.

Основная часть

В процессе исследований решались следующие задачи:

- проведение входного контроля параметров солнечной станции в лабораторных условиях;
- проведение зимнего цикла измерений выходных параметров $I_{кз}$ и U_{xx} солнечной панели с учетом температуры и освещенности;
- исследование влияния азимута и угла наклона солнечной панели на ее

выходные параметры;

- исследование температурных зависимостей $I_{кз}(T)$, $U_{xx}(T)$ солнечной панели.

Входной контроль параметров солнечной панели первоначально проводился в лабораторных условиях с использованием галогенного источника (λ) светового потока мощностью 500 Вт с отражателем (рис. 2,б). Как известно [1], такой источник генерирует излучение, спектр которого близок к солнечному.

Для измерения светового потока использовался люксметр ТКА-ПК, тока и напряжения – мультиметры В7-58. В результате для трех расстояний r от источника света до СБ, равных 710, 1210 и 1470 мм, получены три поверхности распределения освещенности по фронтальной плоскости панели, показанные на рис.1. Поверхность с максимальным перепадом освещенности (1) соответствует $h=710$ мм, а с минимальным (3) – $h=470$ мм. Кроме этого для трех указанных режимов проведения эксперимента измерялись параметры U_{xx} , $I_{кз}$ и вычислялась средняя освещенность (в $Лк \cdot 10^3$).

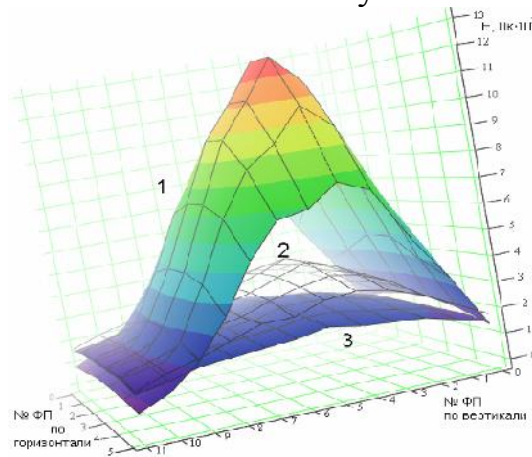


Рис. 1. Распределение освещенности по поверхности солнечной панели

Таблица 1. Результаты измерений

№ графика	$h, мм$	$E_{max}, Лк \cdot 10^3$	$U_{xx}, В$	$I_{кз}, А$
1	710	123	18,4	0,47
2	1210	44	18,2	0,5
3	1470	28	17,8	0,4

Как известно [2], согласно фотометрическому закону изменения освещенности E с изменением расстояния сила света I с учетом направления на освещенный элемент определяется выражением

$$I = \frac{Er^2}{\cos \alpha},$$

где α — угол падения света на элемент поверхности. Для постоянного источника света и $\alpha=0$ получим

$$I = E_1 r_1^2 = E_2 r_2^2$$

или

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

Согласно результатов измерений $r_1=0,71м$, а $r_2=1,47м$, отношение

освещенностей E_1 и E_2 составит $\frac{E_1}{E_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} = 4.286$

Экспериментально измеренные освещенности E составили $E_1 = 123 \text{ Лк}$ и $E_2 = 28 \text{ Лк}$, а их отношение соответственно 4,39. Следует отметить, что при сравнительно точной ориентации галогенной лампы по отношению к центру солнечной панели максимум освещенности смещался на 5-10% относительно нормали к ее поверхности.

В целом, с учетом зависимостей на рис. 1 можно сделать вывод, что в лабораторных условиях солнечную панель можно использовать как измерительную матрицу для исследования направленности оптического излучения разных типов светоизлучающих элементов.

Для проведения исследований авторами была смонтирована солнечная станция (рис. 2), содержащая СБ, состоящую из двух солнечных панелей KV150/24(12)-M, каждая из которых имеет следующие параметры: максимальная выходная мощность — 150 Вт; ток короткого замыкания $I_{кз}$ — 9,8 А; напряжение холостого хода U_{xx} — 21,75В; оптимальный выходной ток $I_{опт}$ — 8,9 А; оптимальное выходное напряжение $U_{опт}$ — 16,86 В. Перечисленные параметры гарантируются изготовителем при удельной мощности светового потока 1000 Вт/м^2 и температуре $(+25)^\circ\text{C}$. Кроме этого в состав станции входят контроллер (К) Solarix Sigma 12/24V 20А, инвертор (И) Кулон Q-500, аккумуляторная батарея (АКБ) SP12-120. Солнечная станция в собранном виде представлена на рис. 2, а.

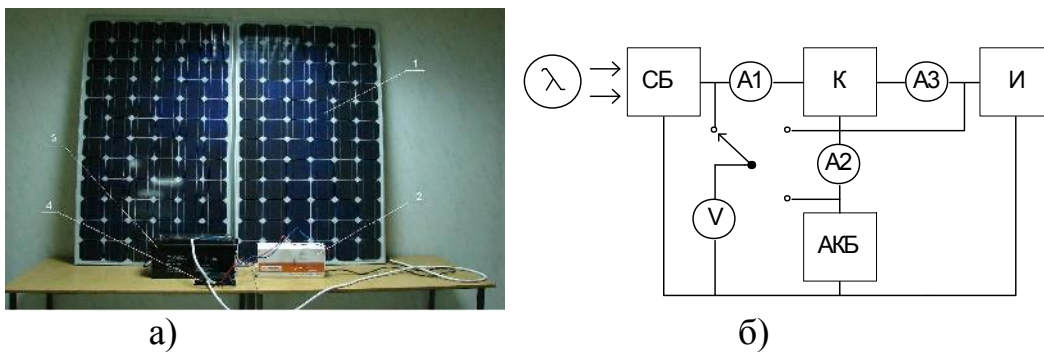


Рис. 2. а) Солнечная станция в собранном виде

1-солнечная панель; 2-инвертор; 3-аккумуляторная батарея; 4-контроллер;
б) Схема контроля параметров станции

Далее в открытых зимних условиях пасмурной и солнечной погоды исследовалась зависимость параметров U_{xx} , $I_{кз}$ панели от времени в пределах светового дня с учетом температуры, освещенности и угла ее наклона α .

Исследование временных зависимостей U_{xx} , $I_{кз}$ выполнялось для трех значений угла α , равных 25° , 35° и 45° с регистрацией в отсчетных точках температуры и освещенности.

Следует отметить, что в последнее время [3] исследования реально достижимых параметров кремниевых монокристаллических солнечных панелей проводятся как в Украине, так и за ее пределами. На рис.3 приведены результаты исследований в Кракове (Польша), Полтаве и в ХНУРЭ в разное время года. Как видим, суточный характер изменения освещенности практически одинаков.

В процессе экспериментальных исследований в дневное время с 9.30 утра до 16 часов дня с интервалом 30 минут регистрировались значения температуры воздуха, освещенности и выходные параметры U_{xx} и $I_{кз}$.

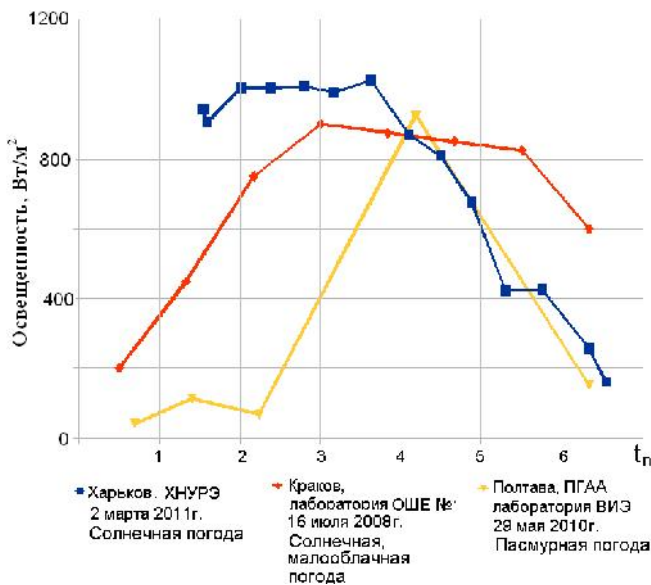


Рис. 3. Результаты измерений напряжения U_{xx} , тока $I_{кз}$ при различных температурах, освещенности и угле наклона батареи

9 часов 30 минут; t — текущее время, равное

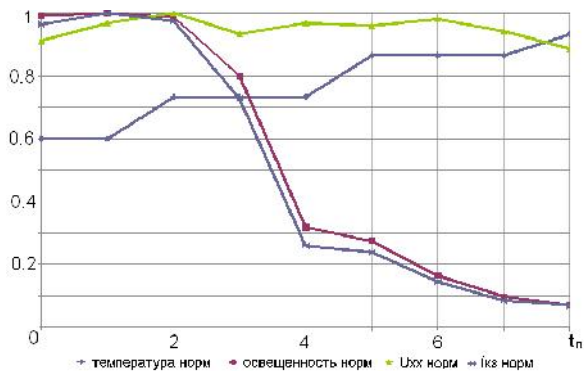


Рис. 4. Нормированные зависимости основных параметров

потока от фронтальной поверхности; η - квантовый выход; K_c - коэффициент сбора фотоносителей; S - площадь фронтальной поверхности.

Из формулы для I_ϕ следует, что все множители кроме параметра Φ_0 являются константами, и поэтому временная зависимость тока $I_{кз}$ действительно воспроизводит график изменения освещенности.

Характерно, что напряжение U_{xx} на этом же отрезке времени практически мало изменяется, что легко объясняется с помощью известного соотношения

$$U_{кз} = \varphi_T \cdot \ln\left(\frac{I_\phi}{I_0} + 1\right) \quad \tau = \frac{k \cdot T}{e}$$

где I_0 — ток насыщения, e — заряд электрона.

Поскольку температура медленно изменяется с течением времени множитель φ_T в процессе эксперимента практически остается постоянным как и ток насыщения I_0 . Следовательно, параметр U_{xx} связан с током $I_{кз}$ логарифмической зависимостью и поэтому мало изменяется.

Результаты оценки выходной мощности по измеренным параметрам U_{xx} и $I_{кз}$

В результате было получено 12 дискретных значений ранее перечисленных параметров. В течении всего цикла измерений угол наклона солнечной панели составлял 65° . Результаты исследований после нормировки по отношению к максимальному значению параметров представлены на рис. 4.

По горизонтальной оси отложены

$$t_n = \frac{t - t_0}{30}$$

нормированные значения временных интервалов, где t_0 - время начала измерений, равное $t = t_0 + n \cdot 30$, $n = 1, 2, 3 \dots 12$.

Из графиков можно сделать вывод, что зависимость тока $I_{кз}$ практически совпадает с графиком изменения освещенности. Это объясняется тем, что для кремниевых монокристаллических преобразователей ток $I_{кз}$ практически совпадает с током I_ϕ , который равен [4, 5]

$$I_{кз} = I_\phi = \frac{e}{h\nu} (1 - R) \eta K_c \cdot S$$

Φ_0 - входной световой поток; R - коэффициент отражения светового

представлены на рис. 5 массивом точек, цветовая кодировка которых определяет день проведения измерений. Аппроксимация искомой зависимости представлена прямой линией. Следовательно выходная мощность солнечной панели пропорциональна освещенности.

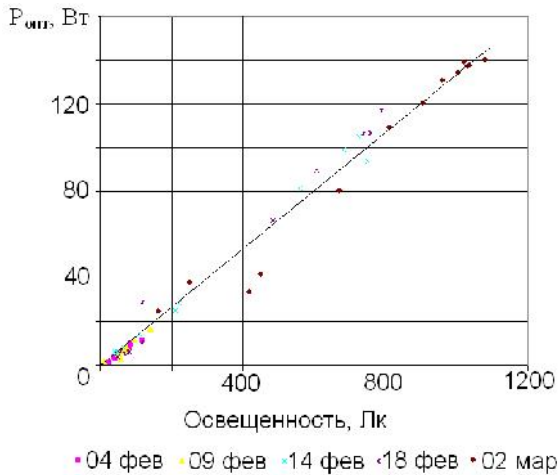


Рис. 5. Зависимость выходной мощности солнечной панели от освещенности

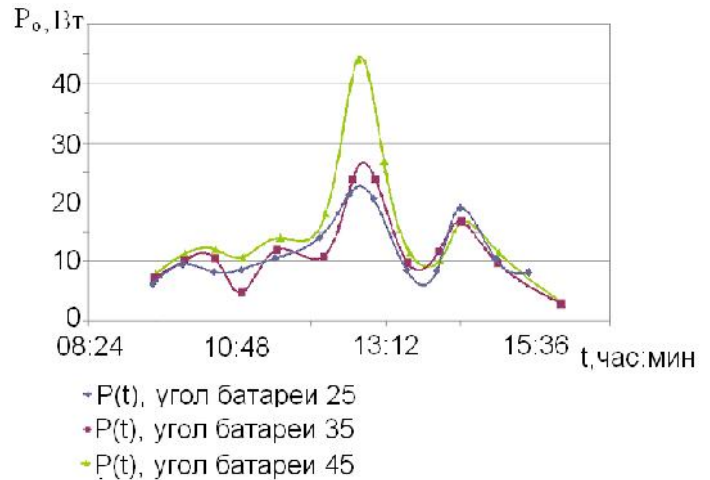


Рис. 6. Зависимость выходной мощности солнечной панели от времени при разных углах наклона

Представленные на рис. 6 временные зависимости были получены в зимних условиях 9 февраля 2011 г. при пасмурной погоде. Наблюдается модуляция выходной мощности солнечного модуля за счет медленного перемещения облачного покрова разной оптической плотности. Кроме этого на отрезке времени (12.00 — 13.00) четко просматривается основной максимум выходной мощности, когда угол подъема Солнца по отношению к линии горизонта достигает максимального значения, и световой поток практически направлен по нормали к поверхности солнечной панели (угол наклона батареи 45°). Поэтому большинство пользователей солнечных батарей выставляют угол наклона солнечных панелей, равный 45°.

Проводились исследования зависимости параметров $I_{кз}$ и $U_{хх}$ при разном значении азимута Солнца по отношению к солнечной панели в условиях пасмурной и ясной погоды (рис. 7).

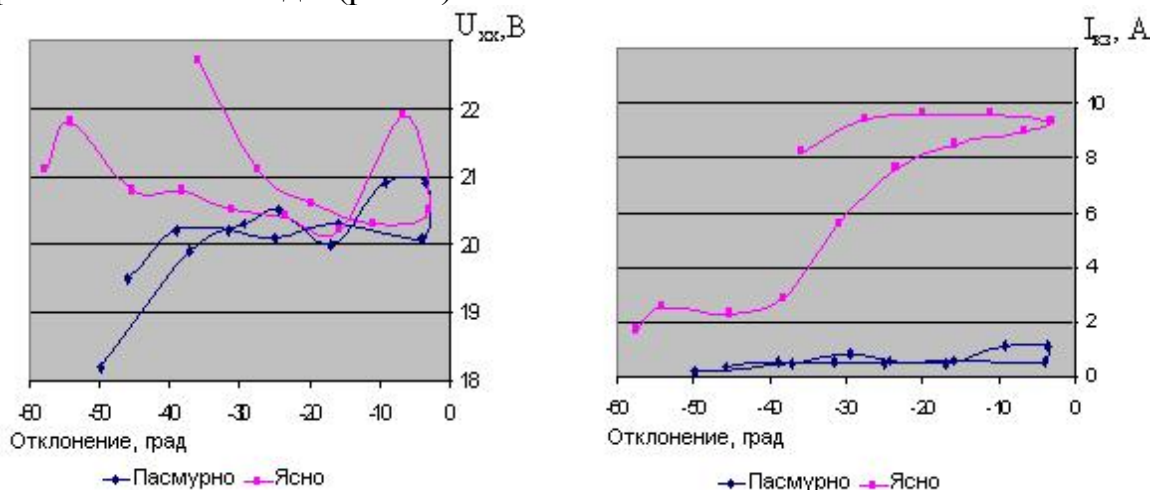


Рис.7. Зависимости параметров $I_{кз}$, А и $U_{хх}$, В при разном значении азимута Солнца по отношению к солнечной панели в условиях пасмурной и ясной погоды.

Из-за симметричности отклонения Солнца относительно нормали к плоскости солнечной панели при установке ее в южном направлении, происходит изменение электрических параметров в виде кривых, которые можно назвать солнечным гистерезисом.

В зимний период в ясную солнечную погоду существенно проявляется перепад температур в течении светового дня. Это позволило исследовать температурные зависимости выходных параметров U_{xx} и $I_{кз}$.

Для их анализа используем известное уравнение ВАХ ФП:

$$U = \frac{AkT}{e} \ln \left(\frac{I_{\phi} - 1}{I_s} + 1 \right).$$

Производная $\frac{dU}{dT}$, как известно [4], имеет вид:

$$\frac{dU}{dT} = \frac{U}{T} - \frac{AkT}{eI_s} \cdot \frac{dI_s}{dT} + \frac{AkT}{e} \cdot \frac{1}{I_{\phi} - 1} \cdot \frac{d(I_{\phi} - 1)}{dT}.$$

Входящий в третье слагаемое фототок I_{ϕ} слабо зависит от температуры, так как

$$I_{\phi} = eK_c g_0 S \eta,$$

где K_c – интегральный коэффициент собирания; η – квантовый выход; S – площадь ФП; $g_0 S$ – число фотонов, поглощаемых за единицу времени.

Коэффициент собирания K_c зависит от диффузионной длины фотонносителя L

$$K_c = f(L) \quad L = \sqrt{D\tau}$$

где D – коэффициент диффузии; τ – время жизни фотонносителей.

При этом $D \sim \sqrt{T}$, а τ практически слабо зависит от температуры.

С учетом известной зависимости тока насыщения I_s от температуры второе слагаемое, при условии $A=1$, имеет вид:

$$-\frac{AkT}{eI_s} \cdot \frac{dI_s}{dT} = -\frac{kT}{e} \cdot \frac{E_g}{kT^2} = -\frac{E_g}{eT}.$$

Тогда

$$\frac{dU}{dT} = \frac{U}{T} - \frac{E_g}{eT} = -\frac{E_g - eU}{eT}.$$

Поскольку всегда $E_g > eU$, температурный коэффициент напряжения будет отрицательным, и с ростом температуры выходное напряжение ФП уменьшается. На рис.8 а) приведены температурные зависимости $I_{кз}$ и $U_{кз}$ для кремниевого монокристаллического ФП. Здесь же на рис. 8 б) приведены аналогичные зависимости для солнечной панели. Приведенные в литературе [4] значения температурных коэффициентов напряжения $U_{кз}$ и тока $I_{кз}$ для кремниевых монокристаллических ФП равны.

$$\frac{dU_{кз}}{dT} = -1.5 \text{ мВм} / \text{град} \quad \frac{dI_{кз}}{dT} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ А} \cdot \text{град} / \text{см}^2$$

С помощью экспериментально полученных температурных зависимостей $I_{кз}$ и $U_{кз}$ (рис. 8 б)) для солнечной панели на основе монокремния были вычислены температурные коэффициенты для этих параметров.

$$\frac{dU_{кз}}{dT} = -41,7 \text{ мВм} / \text{град} \quad \frac{dI_{кз}}{dT} = 7.6 \cdot 10^{-4} \text{ А} \cdot \text{град} / \text{см}^2$$

Как и следовало ожидать, за счет влияния сопротивлений контактных переходов ФП, соединенных последовательно, в составе солнечной батареи температурные коэффициенты оказались ниже.

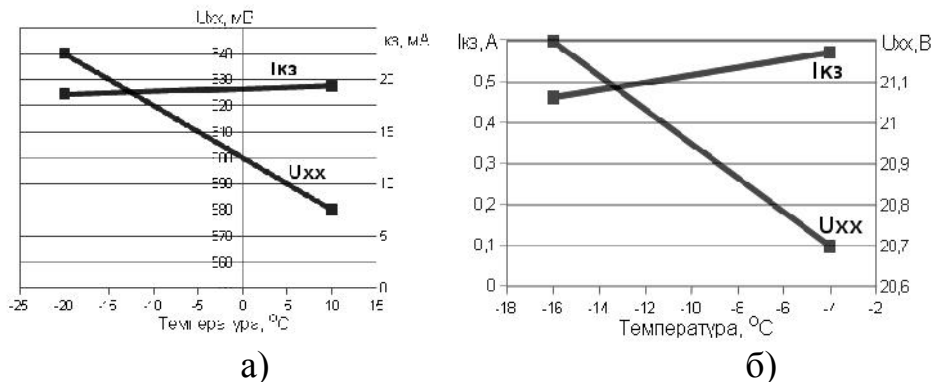


Рис. 8. а) Температурные зависимости параметров $I_{кз}$ и U_{xx} для кремниевого монокристаллического фотопреобразователя
 б) Температурные зависимости параметров $I_{кз}$ и U_{xx} для кремниевой монокристаллической солнечной панели

Результаты исследований

1. Проведенные исследования функционирования солнечной станции подтвердили надежность ее работы при разных климатических и температурных режимах.

2. Экспериментально подтверждено, что ток короткого замыкания $J_{кз}$ прямо зависит от освещенности E , а напряжение холостого хода U_{xx} изменяется несущественно из-за логарифмического характера зависимости от параметра $I_{ф}=I_{кз}$.

3. Измерения показали, что в пределах суток влияние азимута Солнца значительно выше, чем влияние угла его подъема над горизонтом. Следовательно, при разработке трекеров ввиду больших энергозатрат на перемещение солнечной панели достаточно ограничиться ее автоматическим поворотом вокруг вертикальной оси с возможностью дискретной установки по горизонтальной оси 4-6 раз в год.

4. Проведенные температурные исследования позволили сделать вывод о том, что температурные коэффициенты U_{xx} и $J_{кз}$ для солнечной станции существенно больше, чем для солнечного монокристаллического элемента в силу влияния большого суммарного последовательного сопротивления.

Список литературы: 1. *Безручко К.В.* Солнечные энергосистемы космических аппаратов. Физическое и математическое моделирование / К.В. Безручко, Н.В. Белан, С.В. Губин, В.И. Драновский/ под ред. акад. Конюхова С.Н. - Харьков: Гос. Аэрокосмич. Ун-т «Харьков. Авиаци. Ин-т», 2000. - 515 с. 2. *Слипченко Н.И.* Оперативный контроль параметров фотопреобразователей / Н.И. Слипченко, В.А. Письменецкий, Н.Н. Яновская // Восточно-европейский журнал передовых технологий. - Харьков, 2007. - №4/3 (28). С. 39 — 42. 3. *Титко Р., Калініченко В.* Відновлювальні джерела енергії (досвід Польщі для України). Вид. OWG, Варшава. 2010.-533с. 4. *Васильев А.М., Ландсман А.П.* Полупроводниковые фотопреобразователи.-М.: Сов. радио, 1971.- 246с. 5. *Раушенбах Г.В.* Справочник по проектированию солнечных батарей.-М.: Энергоиздат, 1983.-360с.

Поступила в редколлегию 25.05.2011