

УДК 621. 311

С.В.Губин, канд.техн.наук, М.Г.Гонтарь (Национальный аэрокосмический ун-т им. Н.Е.Жуковского "ХАИ", Харьков)

## Динамическое моделирование уравнения работы фотоэлектрической батареи с учетом изменения температуры панели

Подключение потребителя к централизованной сети не гарантирует обеспечения качественной электроэнергией и бесперебойной подачи электричества. Применение альтернативных источников энергии в качестве резервных особо интересно в настоящее время. В данной статье математическая модель работы фотоэлектрической батареи реализована в среде имитационного моделирования. Разработана блок-схема на основе математических уравнений. Проведен анализ корректности работы разработанной модели.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, солнечная энергетика, динамическое моделирование, имитационный эксперимент, гарантированное электроснабжение.

Підключення споживача до централізованої мережі не гарантує забезпечення якісною електроенергією і безперебійною подачею струму. Застосування альтернативних джерел енергії як резервних особливо цікаве в даний час. У даній статті математичну модель роботи фотоелектричної батареї реалізовано в середовищі імітаційного моделювання. Розроблено блок-схему на основі математичних рівнянь. Проведено аналіз коректності роботи розробленої моделі.

**Ключові слова:** відновлювані джерела енергії, сонячна енергетика, динамічне моделювання, імітаційний експеримент, гарантоване електропостачання.

**1. Введение.** Фотоэлектрические преобразователи применяются как в стационарных системах электроснабжения, так и в переносных. Это с легкостью позволяет использовать солнечные панели в автономных системах. Для определения целесообразности применения солнечных панелей в той или иной электрогенерирующей системе следует сопоставить мощность потока солнечного излучения, преобладающего на рассматриваемой территории, и выходную мощность системы. Поэтому применение имитационного эксперимента является быстрым и эффективным способом анализа работы исследуемой системы. Для увеличения скорости расчетов математические модели в готовых программных продуктах упрощают.

**2. Математическая модель ВАХ БФ.** Решение таких задач как оптимизация схемы БФ, определение оптимальной рабочей точки БФ в условиях изменяющейся освещенности и температуры, оценка схемных потерь, определение влияния частичного затенения на выходные характеристики БФ, расчет и моделирование системы электроснабжения требует моделирования вольт-амперной характеристики (ВАХ) БФ [2].

Реализация уравнений осуществляется в среде динамического моделирования *MathLab Simulink* [5, 15]. *Simulink* – это интерактивная графическая программа, которая позволяет моделировать динамические системы на уровне структурных и функциональных схем. Библиотеки *Simulink* содержат большое количество разнообразных функциональных блоков, которые отображаются на экране в виде пиктограмм.

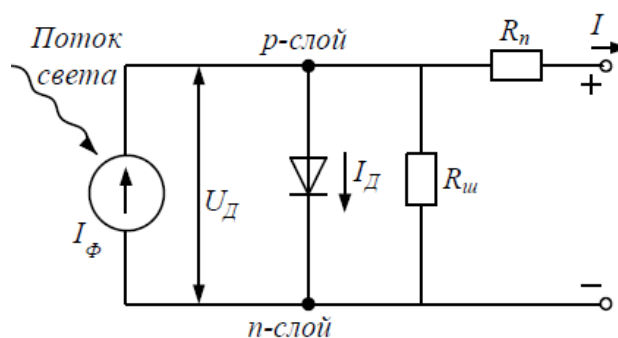


Рис. 1. Схема замещения ФП.

БФ наземного применения характеризуются высоким значением шунтового сопротивления  $R_{ш}$  (рис. 1). С целью упрощения модели величиной шунтового  $R_{ш}$  и последовательного  $R_n$  сопротивлений пренебрегаем, поэтому имеем зависимость [6]:

$$U_{БФ} = \frac{A \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_o}{I_\phi} - 1\right). \quad (1)$$

Параметр модели диодный коэффициент  $A$  обычно представляется константой, хотя в отдельных публикациях рекомендуется функциональная зависимость от температуры;  $k$  – постоянная Планка, Дж/К;  $T$  – температура панели БФ, К;  $q$  – заряд электрона, Кл;  $I_o$  – обратный ток, А;  $I_\phi$  – фототок, А.

Вместе с тем считается, что лучшей для инженерной практики точности можно достичь, используя эмпирическую экспоненциальную функцию. Зависимости подобного вида удобны еще и потому, что они представляют ВАХ по трем характеристическим точкам, которые могут быть достаточно просто измерены:

- ток короткого замыкания,  $I_{кз}$ ;
- напряжение холостого хода,  $U_{хх}$ ;
- ток и напряжение в оптимальной точке.

Однако при этом не учитывается конкретная схема замещения, что приводит к таким существенным для практики недостаткам, как отсутствие достаточно достоверных экстраполирующих свойств модели.

В общем виде экспоненциальную модель ВАХ БФ можно записать так:

$$I_n = I_\phi - I_o \left( e^{\frac{q \cdot U_{хх}}{A \cdot k \cdot T}} - 1 \right). \quad (2)$$

Параметры модели представляют собой функциональные зависимости от освещенности  $E$  и температуры  $T$ , которые в соответствии с данными работы [3] таковы:

$$U_{хх} = U_{хх} - U_{хх} \cdot dUt \cdot \Delta T, \quad (3)$$

где  $dUt$  – температурный коэффициент напряжения, %/°С;  $\Delta T$  – разница температур между паспортным и текущим значениями БФ.

$$I_o = \frac{I_\phi}{e^{\frac{q \cdot U_{хх}}{A \cdot k \cdot T}}}, \quad (4)$$

$$I_\phi = I_{кз} \frac{E_k}{E_o} - I_{кз} \frac{E_k}{E_o} dIt \cdot \Delta T, \quad (5)$$

где  $dIt$  – температурный коэффициент тока, %/°С.

**Расчет температуры БФ.** Расчет температуры БФ основан на решении уравнения теплового баланса [2]:

$$C_m M_s \frac{dT}{dt} = Q_{ЭП} - Q_{конв} - Q_{луч} - N_{y\phi}, \quad (6)$$

где  $C_m$  – удельная теплоемкость материала БФ панели, Дж/кг·К;  $M_s$  – удельная масса панели, кг/м<sup>2</sup>;  $t$  – время, с;  $T$  – средняя равновесная температура панели, К;  $Q_{ЭП}$  – тепловой поток от внешних источников тепла, Вт/м<sup>2</sup>;  $Q_{конв}$  – тепловой поток от внутренних источников тепла, Вт/м<sup>2</sup>;  $Q_{луч}$  – тепловой поток при лучистом теплообмене, Вт/м<sup>2</sup>;  $N_{y\phi}$  – удельная электрическая мощность панели, Вт/м<sup>2</sup>.

$$Q_{конв} = (5,6 + 4V) \cdot F \cdot (T_{БФ} - T_{окр}), \quad (7)$$

$$Q_{луч} = -\varepsilon_l \sigma T^4, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_l$  – интегральные коэффициенты излучения лицевой поверхностей панели;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Итак, для  $N_{y\phi}$  запишем следующее выражение:

$$N_{y\phi} = E_K \cdot \eta \cdot k_{зан}, \quad (9)$$

где  $k_{зан}$  – коэффициент заполнения рабочей поверхности панели БФ фотопреобразователями.

$$C_m M_s \frac{dT}{dt} = Q_{ЭП} - (5,6 + 4V) \cdot F \times \\ \times (T_{БФ} - T_{окр}) - \varepsilon_l \sigma T^4 - E_K \cdot \eta \cdot k_{зан}. \quad (10)$$

**3. Реализация уравнений.** Подсистема "окружающая среда" является блоком с исходными данными, которые имитируют поведение погодных условий и определяют энергоприход для СЭУ [14]. Также производится пересчет температуры панели БФ по уравнению (10). Входными характеристиками являются интенсивность солнечного излучения [9] и температура воздуха (рис. 2, 3).

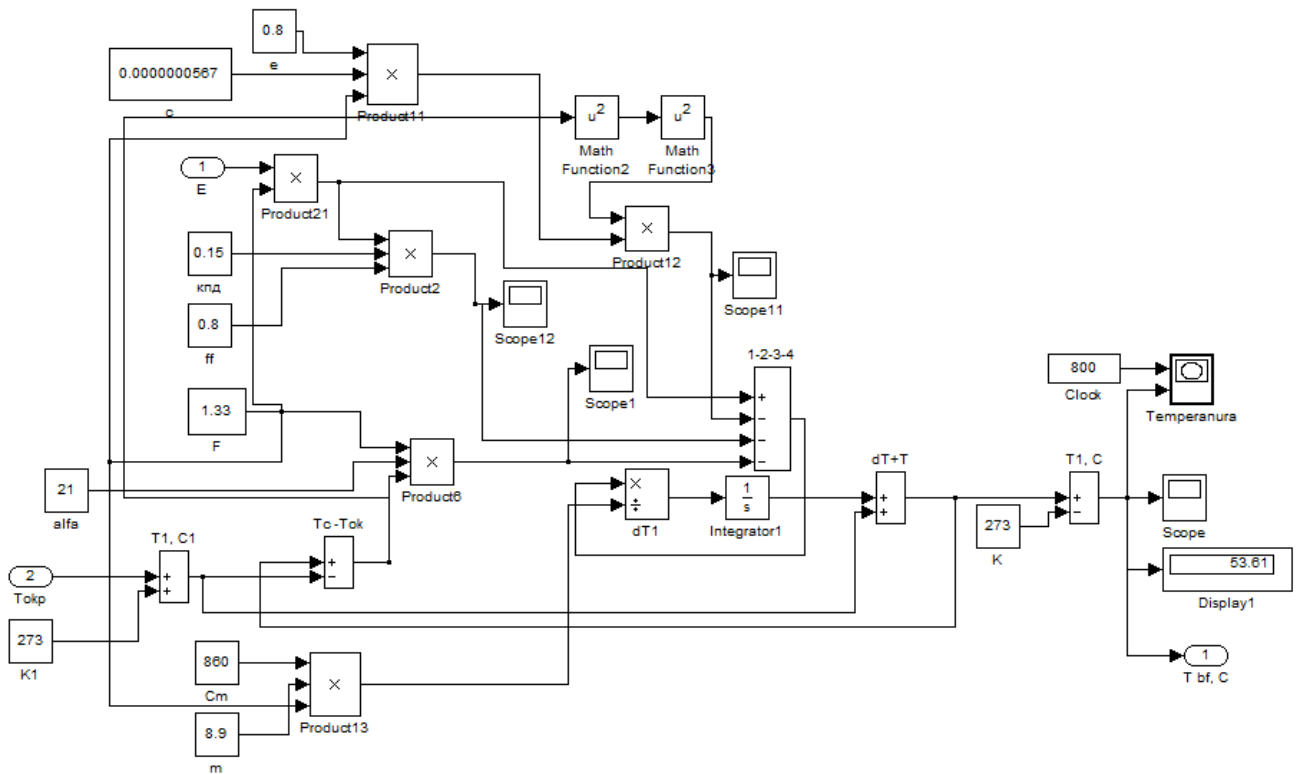


Рис. 2. Реализация уравнения для расчета температуры солнечной батареи.

Для определения мощностных характеристик БФ входными данными являются интенсивность солнечного излучения, температура окружающей среды и панели БФ. Модель позволяет определить напряжение и ток одного фотопреобразова-

теля. Далее из 48 шт. ФЭП составляем модуль, соединяя элементы последовательно. В батарее 4 модуля, два из которых соединяем последовательно и два – параллельно для обеспечения требуемого выходного тока и напряжения (рис. 3).

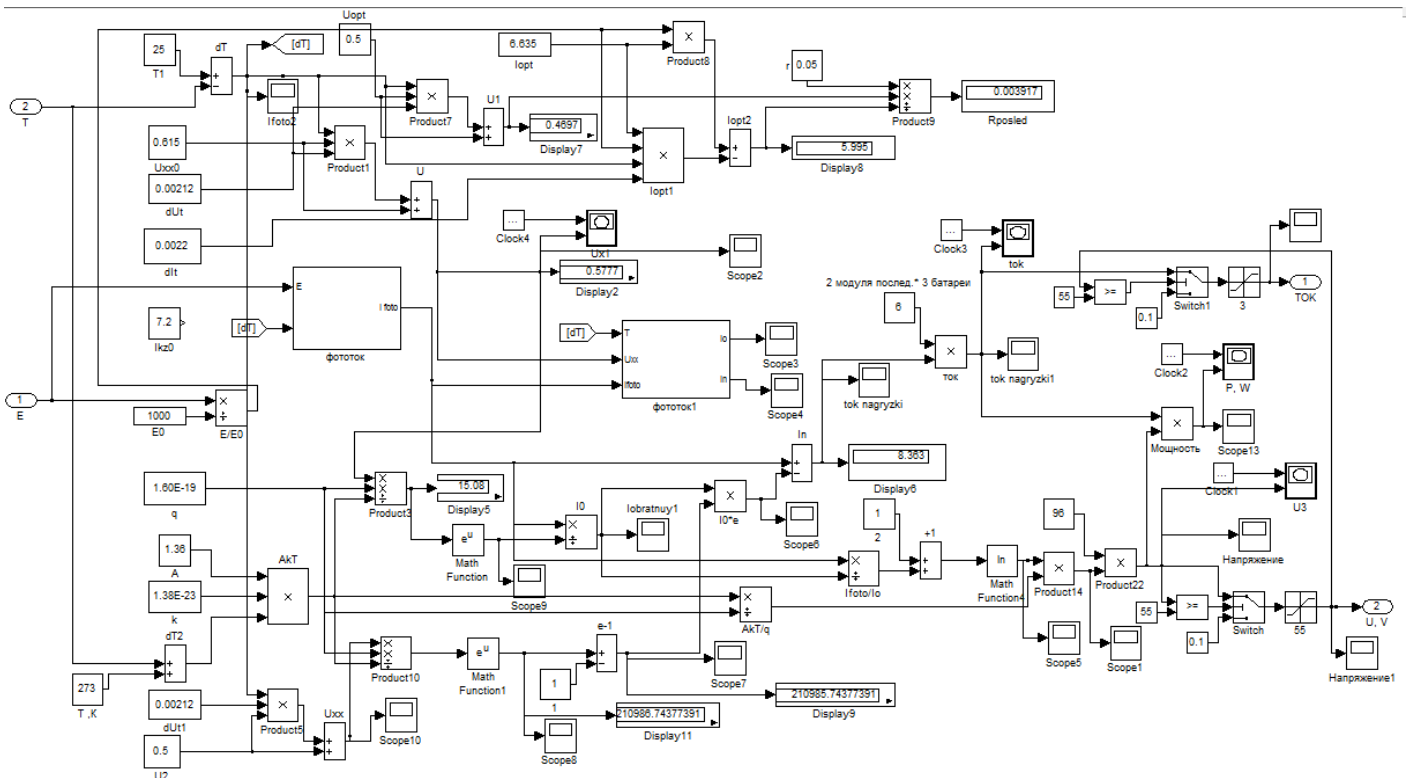


Рис. 3. Реализация уравнений подсистемы "солнечная батарея".

**4. Проверка работы модели для определения температуры БФ.** При динамическом моделировании на определение электрических параметров БФ также влияет изменение температуры фотоэлектрического модуля. Как видно из рис. 4, панель прогревается до температуры 50°C за 20 минут, а затем работает в установившемся режиме. Равновесная температура наступает за счет конвективного теплообмена панели с окружающей средой, теплового излучения поверхности и отбора электрической мощности.

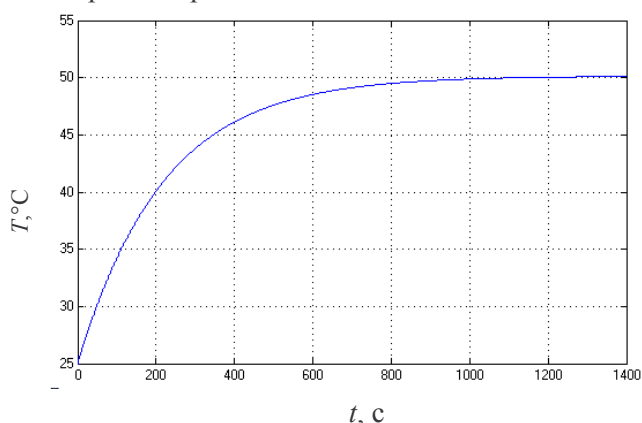


Рис. 4. Величина температуры панели БФ.

**5. Построение вольт-амперной характеристики БФ.** После реализации математических уравнений в виде блок-схем и подсистем следует оценить адекватность полученных результатов. При динамическом моделировании входные параметры окружающей среды могут изменяться по случайному закону, поэтому для соответствия входных и выходных величин произведем статическое моделирование процесса работы энергоустановки. При статическом расчете БФ основной характеристикой работы установки является вольт-амперная характеристика (рис. 5). Примем исходные

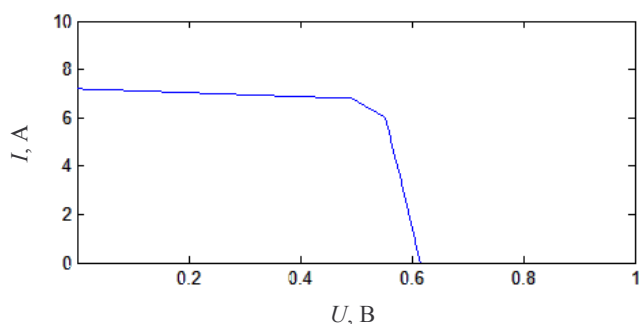


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика фотопреобразователя солнечной батареи.

данные для проверочного расчета: скорость ветра – 8 м/с; величина солнечной радиации – 1000 Вт/м<sup>2</sup>; температура наружного воздуха 25°C. Вольт-амперная характеристика солнечной батареи будет рассчитана без учета изменения температуры панели модулей.

Паспортные значения тока и напряжения фотоэлемента (табл. 1) взяты из спецификации на фотоэлектрический преобразователь из монокристаллического кремния с диагональю 220 мм [12].

Таблица 1. Паспортные значения тока и напряжения фотоэлемента

$I_{pm}, A$	$V_{pm}, V$	$I_{sc}, A$	$V_{oc}, V$
8,691	0,525	8,821	0,635

Сравним полученные данные (рис. 5) и паспортные значения (табл. 2) в характерных режимах – в рабочей точке и короткого замыкания.

Таблица 2. Определение дисперсии для расчета коэффициента Фишера

Паспортные значения		Расчетные величины		
$U, B$	$I, A$	$U, B$	$I, A$	$D$
0	8,821	0	7	3,32
0,525	8,691	0,525	7,3	1,93

Проверим адекватность построенной модели с помощью критерия Фишера. Для этого сопоставим критическое и расчетное значение коэффициента [10]:

$$F_{расч.} \leq F_{крит.}; \tag{11}$$

$$F_{расч.} = \frac{D_1}{D_2}, \tag{12}$$

где  $D_1, D_2$  – дисперсия каждой выборки.

При этом обязательно величина дисперсии в числителе должна быть больше дисперсии стоящей в знаменателе:

$$F_{расч.} = \frac{3,32}{1,93} = 1,71;$$

$$1,71 \leq 6,94.$$

Отношение дисперсий равно 1,71. Оно меньше табличного значения критерия Фишера  $F(0,05, 2, 4) = 6,94$ , дисперсии отличаются незначительно, следовательно, выборки можно объединить.

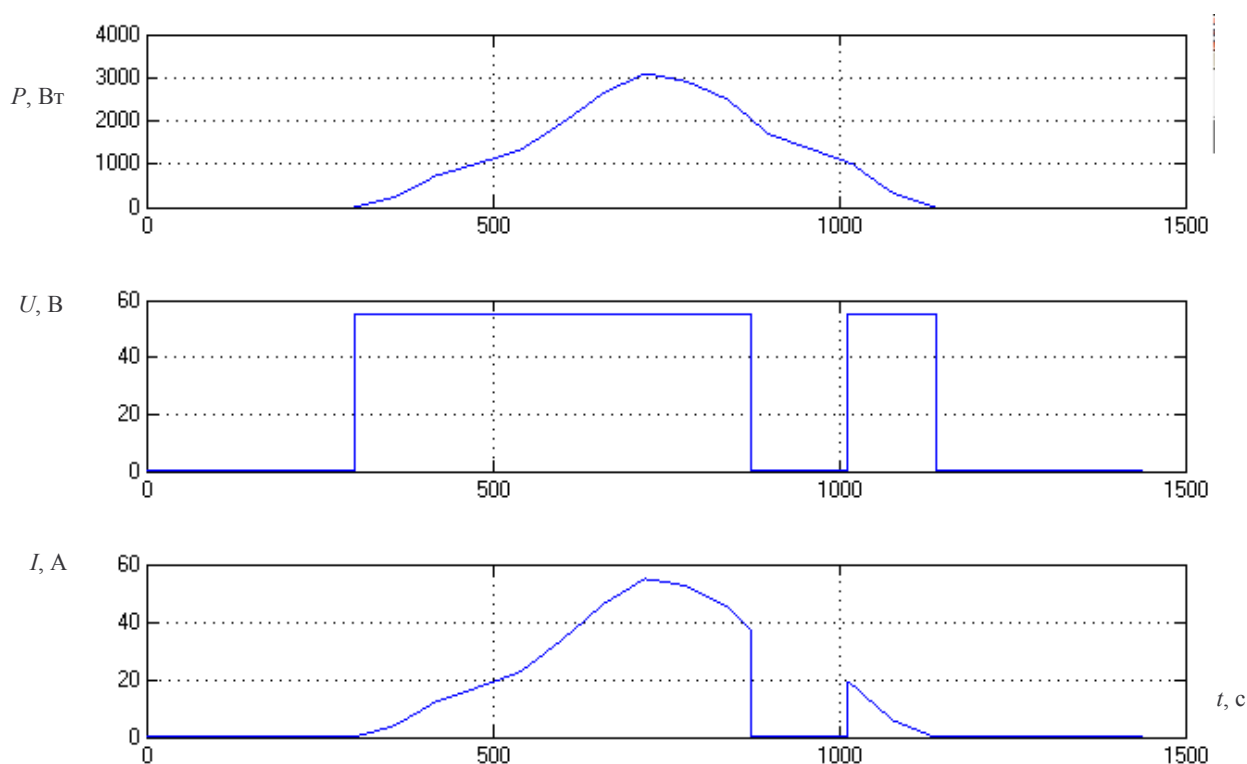


Рис. 6. Выходные параметры СЭУ: текущее значение мощности, Вт, напряжение, В и ток, А на ШИМ-регуляторе.

**6. Характеристики СЭУ.** Для процесса моделирования приняты параметры фотоэлектрической батареи, состоящей из отдельных модулей. Модуль состоит из 48 последовательно соединенных фотоэлементов на кремниевой основе (наземного назначения, квазиквадратные с размером  $156 \times 156$  мм). БФ состоит из 2-х последовательно и 2-х параллельно соединенных модулей. Общая мощность СЭУ составляет 3 кВт. Выходные характеристики батареи представлены на рис. 6.

**Выводы.** СЭУ работает только в дневной период и является источником мощности, которая необходима для работы потребителей и заряда аккумуляторной батареи. На рис. 6 виден провал напряжения и тока после ШИМ-регулятора – это объясняется влиянием температуры на выходные параметры СЭУ. Несмотря на достаточный уровень освещенности, панель так нагревается в течение дня, что необходимо время для восстановления температурного баланса. В данной модели температура модуля зависит от потока солнечного излучения, скорости ветра, температуры окружающей среды, поэтому перегрев может существенно повлиять на работу установ-

ки в жаркую безветренную погоду. Учитывая этот фактор, мощности одной СЭУ будет недостаточно для энергообеспечения потребителя в полной мере. Как видно из графика, после определенного снижения температуры модулей СЭУ способна выдавать требуемое напряжение даже при более слабой освещенности БФ.

1. *Базыма Л.А.* Компьютерное моделирование энергетических комплексов на основе нетрадиционных источников энергии – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 2006. – 57 с.
2. *Безручко К.В., Губин С.В.* Автономные наземные энергетические установки на возобновляемых источниках энергии – Харьков.: НАУ "ХАИ", 2007. – 310 с.
3. *Губин С.В., Яковлев А.И.* Теория планирования экспериментов в энергетике: Курс лекций для высших технических учебных заведений – Киев, "Миллениум", 2009. – 180 с.
4. *Москатов Е.А.* Электронная техника – Таганрог, 2004. – 121 с.
5. *Молчанов А. А.* Моделирование и проектирование сложных систем – К.: Вища. шк. Головне изд-во. 1988. – 359 с.
6. *Раушенбах Г.* Справочник по проектированию солнечных батарей – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.
7. Регуляторы СЭУ [Текст]: конспект лекций – Харьков: Нац. Аэрокосмический ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 2000. – 60 с.

8. Романов В. Н. Системный анализ для инженеров – СПб: СЗГЗТУ – 2002. – 186 с.
9. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки – М. Энергоатомиздат, 1991 – 208 с.
10. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента – 290 с.
11. Вольт-амперные характеристики фотопреобразователей [Электронный ресурс]: Официальный сайт "Hebes corporation". – Режим доступа: <http://www.hebesolar.com>.
12. Спецификация на фотопреобразователи из монокристаллического кремния, размером 156x156 мм [Электронный ресурс]: ПАО "Квазар", производитель БФ. – Режим доступа: <http://www.kvazar.com>;
13. Характеристики энергогенерирующего оборудования [Электронный ресурс]: Официальный сайт фирмы "Аванте". – Режим доступа: <http://www.avante.com.ua>;
14. Данные по температуре окружающей среды, интенсивности солнечного излучения, средней скорости ветрового потока [Электронный ресурс]: Архив метеоданных. – Режим доступа: <http://www.meteorprog.ua>;
15. Черных И.В. "Simulink: Инструмент моделирования динамических систем" [Электронный ресурс]: Информационный центр MathWorks. – Режим доступа: <http://www.matlab.exponenta.ru/simulink/book>;

УДК 621.383.51

А.В.Гамарко (Институт відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

### Методи чисельної апроксимації вольт-амперних кривих фотоелектричного модуля

*В даній роботі розглядаються існуючі математичні моделі фотоелектричних модулів(ФМ) та пропонується використовувати лінійну апроксимацію для створення математичної моделі ФМ.*

**Ключові слова:** фотоелектричний модуль, математичні моделі, вольт-амперні характеристики, інтерполяція, чисельна апроксимація, похибка, кубічний сплайн, система лінійних алгебраїчних рівнянь, моделювання на комп'ютері.

*В данной работе рассматриваются существующие математические модели фотоэлектрических модулей (ФМ) и предлагается использовать линейную аппроксимацию для создания математической модели ФМ.*

**Ключевые слова:** фотоэлектрический модуль, математические модели, вольт-амперные характеристики, интерполяция, численная аппроксимация, погрешность, кубический сплайн, система линейных алгебраических уравнений, моделирование на компьютере.

**Вступ.** На даний час однією з ключових проблем моделювання режимів функціонування фотоелектричних модулів в системі з навантаженням є адекватна експериментальним даним розробка математичних моделей вольт-амперних характеристик ФМ, придатних для реалізації розрахункових процесів на ЕОМ.

**Постановка задачі.** Розглянемо основне рівняння вольт-амперних характеристик сонячного елемента з урахуванням параметрів  $A, R_S, R_{SH}$ :

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{e(U + IR_S)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{U}{R_{SH}}, \quad (1)$$

де  $A$  – коефіцієнт, отриманий при порівнянні теоретичної та експериментальної вольт-амперної характеристики, який набуває значення від 1 до 5;  $R_S$  – послідовний опір сонячного елемента;  $R_{SH}$  – шунтовий опір сонячного елемента;  $I$  – струм навантаження або вихідний струм сонячного елемента;  $I_L$  – фотострум, що протікає через р-п перехід фотоперетворювача;  $I_0$  – струм діоду;  $U$  – падіння напруги на навантаженні;  $T$  – термодинамічна температура;  $k$  – стала Больцмана;  $e$  – модуль заряду електрона.