

Г.Г. КИРАКОСЯН, А.Г. КАМАЛЯН, ДЖ.С. СЕВОЯН, Л.Г. КИРАКОСЯН

ВЛИЯНИЕ ЗАТЕНЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОГО МОДУЛЯ

Рассмотрена процедура моделирования и расчета характеристик фотовольтаических элементов, работающих в частично затененном режиме. Оценено влияние коэффициента затенения одного солнечного элемента на основные характеристические параметры фотовольтаического модуля.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, затенение, неявная функция, основная программа, дифференциальное уравнение, подпрограмма, фототок.

Введение. Снижение выходной мощности в фотоэлектрических модулях можно объяснить многими факторами, но, возможно, наиболее важными из них являются затенение и рассогласование точки максимальной мощности [1,2]. Если фотоэлектрический модуль частично затенен, то некоторые его элементы могут работать в обратном смещении, работая как нагрузки, а не как генераторы энергии. Если обратное смещение превышает напряжение лавинного пробоя затененного солнечного элемента (СЭ), то элемент будет полностью поврежден; например, будет наблюдаться растрескивание элемента или образование горячих точек, и на последовательной ветви, к которой подключен элемент, образуется разомкнутая цепь. Появление горячих точек, приводящих к необратимому повреждению фотоэлектрического модуля, относительно легко, если нет защиты на последовательном и параллельном соединении СЭ, образующих фотовольтаический модуль. Ранее расчет характеристик фотовольтаического модуля в условиях затенения был осуществлен с помощью блочного моделирования пакета расширения Simulink системы MATLAB [3]. Однако для обширного класса задач, связанных с моделированием затененного фотовольтаического модуля, средств моделирования без использования языка в явном виде недостаточно.

Диагностика образования горячих точек в PV системах является сложной задачей, но важность последующего снижения выходной мощности из-за этого эффекта мотивировала в последнее время новые подходы к исследованию горячих точек на фотоэлектрических модулях. **Целью данной работы** является изучение изменения основных характеристических параметров фотовольтаического элемента и модуля в зависимости от затенения. Особенностью данной работы является то, что расчет характеристик фотовольтаического модуля выполнялся с помощью основной программы и подпрограммы обслуживания в среде MATLAB.

Моделирование характеристик затененного солнечного элемента.

Для описания электрических характеристик СЭ в условиях освещения и температуры обычно используются модели с одним диодом и с двумя диодами.

После того как исследования явлений горячих точек и рассогласования в фотоэлектрических элементах стали представлять интерес, эти модели были пересмотрены, чтобы иметь дело с обратными характеристиками.

Один из первых подходов модифицирует модель одного диода с предположением, что лавинное умножение влияет главным образом на постоянный ток. Математическая модель СЭ с учетом напряжения пробоя определяется выражением

$$I = \left(I_L - I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \right) M(V) - \frac{V}{R_p}, \quad (1)$$

где q - элементарный заряд; k - постоянная Больцмана; T - абсолютная температура; I_L - фототок, описывающий возбуждение неравновесных носителей солнечным излучением; I_s - ток насыщения диода; $M(V)$ - коэффициент умножения, учитывающий влияние лавинного умножения. Выражение для $M(V)$ имеет вид

$$M(V) = \frac{1}{(1 - (|V|/V_b)^n)}, \quad (2)$$

где V_b - напряжение лавинного пробоя; n - постоянная Миллера.

На рис.1 показана электрическая эквивалентная схема СЭ, учитывающая эффект $M(V)$, моделируемый управляемым источником тока.

Бишоп предложил уравнение, в котором лавинный эффект выражается с помощью нелинейного множителя [3]. Предложенная модель определяется следующим выражением:

$$I = I_L - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V - R_s I)}{kT}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V - R_s I}{R_p} \right) \left[1 + a \left(1 - \frac{V - R_s I}{V_b} \right)^{-n} \right], \quad (3)$$

где a - коэффициент затенения; n - постоянная.

Соответствующая эквивалентная схема показана на рис.2. Принято, что полная тень соответствует значению $\alpha = 1$, тогда как значение $\alpha = 0$ указывает на отсутствие тени на СЭ. Дополнительный множитель $E(V)$ добавляется к току утечки, который моделируется как управляемый источник тока следующего вида:

$$E(V) = 1 + a \left(1 - \frac{V + IR_s}{V_b} \right). \quad (4)$$

Модель Бишопа использовалась в большинстве работ для изучения эффектов рассогласования в фотоэлектрических модулях, составленных из отдельных СЭ.

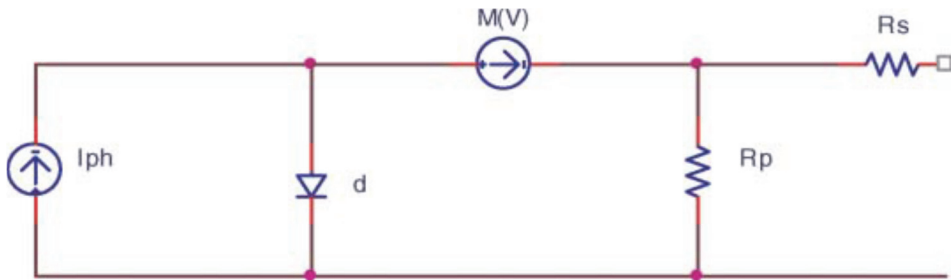


Рис. 1. Эквивалентная схема СЭ с учетом лавинного умножения



Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема согласно модели Бишопа

Вводя обозначения $I = y$, $V = x$ в (3), получим

$$y = I_L - I_s \left[e^{\frac{q(x-R_s y)}{kT}} - 1 \right] - \frac{x-R_s y}{R_p} \left[1 + a \left(1 - \frac{x-R_s y}{V_b} \right)^{-n} \right]. \quad (5)$$

Функция y является неявной функцией от x . Преобразуем уравнение (5) к виду

$$y - I_L + I_s \left[e^{\frac{q(x-R_s y)}{kT}} - 1 \right] + \frac{x-R_s y}{R_p} \left[1 + a \left(1 - \frac{x-R_s y}{V_b} \right)^{-n} \right] = 0. \quad (6)$$

Обозначив левую часть уравнения (6) через $F(x, y)$, получим

$$F(x, y) = 0. \quad (7)$$

Уравнение (7) не разрешается относительно y . Это значит, что при каждом значении $x = x_0$, при котором неявная функция определена, она принимает такое значение y_0 , для которого $F(x_0, y_0) = 0$. Так как $F(x, y)$ – дифференцируемая функция переменных x и y и $F'_y(x, y) \neq 0$, то определяемая

уравнением (7) неявная функция имеет производную, которая вычисляется по формуле

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{F'_x(x,y)}{F'_y(x,y)}, \quad (8)$$

где

$$F'_x(x,y) = Ve^{\frac{q(x-R_S y)}{kT}} + \frac{1}{R_p} \left[1 + a \left(1 - \frac{x-R_S y}{V_b} \right)^{-n} \right] + \frac{an(x-R_S y)}{V_b R_p} \left(1 - \frac{x-R_S y}{V_b} \right)^{-n-1}, \quad (9)$$

$$F'_y(x,y) = 1 - BR_S e^{\frac{q(x-R_S y)}{kT}} - \frac{R_S}{R_p} \left[1 + a \left(1 - \frac{x-R_S y}{V_b} \right)^{-n} \right] - \frac{anR_S(x-R_S y)}{V_b R_p} \left(1 - \frac{x-R_S y}{V_b} \right)^{-n-1}. \quad (10)$$

Здесь введено обозначение $V = I_S q/kT$. Подставив выражения (9) и (10) в формулу (8), имеем

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{Ve^{\frac{q(x-R_S y)}{kT}} + \frac{1}{R_p} \left[1 + a \left(1 - \frac{x-R_S y}{V_b} \right)^{-n} \right] + \frac{an(x-R_S y)}{V_b R_p} \left(1 - \frac{x-R_S y}{V_b} \right)^{-n-1}}{1 - BR_S e^{\frac{q(x-R_S y)}{kT}} - \frac{R_S}{R_p} \left[1 + a \left(1 - \frac{x-R_S y}{V_b} \right)^{-n} \right] - \frac{anR_S(x-R_S y)}{V_b R_p} \left(1 - \frac{x-R_S y}{V_b} \right)^{-n-1}} \quad (11)$$

Задача Коши для дифференциального уравнения (11) первого порядка состоит в том, чтобы найти решение, которое при заданном значении аргумента $x = 0$ принимает значение $y = I_L$, т.е. удовлетворяет начальному условию $y|_{x=0} = I_L$. Для решения этого обыкновенного дифференциального уравнения в форме Коши используются методы численного интегрирования. В среде MATLAB методы численного интегрирования реализуют с помощью функций *ode*. Функцию *ode* в среде MATLAB функцию *ode* называют решателем систем ОДУ – solver ODE (Ordinary Differential Equations). Для интегрирования дифференциального уравнения (11) составляется файл-функция на основе функций *ode*. По существу, файл-функция – это подпрограмма, к которой можно обратиться из файл-сценария или непосредственно в режиме прямых вычислений. Файл-сценарий представляет собой основную (управляющую) программу, либо одну из ее частей (модулей). Программа состоит из операторов, записываемых построчно. По правилам хорошего стиля программирования рекомендуется в начале программы ставить необязательный оператор-заголовок: *script*, после которого обычно ставится команда *clc* для очистки окна *Command Window* перед выводом листинга программы. Существенно, что в отличие от файл-функции, имя файл-сценария нельзя использовать в функциях функций. Подобно файл-функции, файл-сценарий снабжается строками комментариев.

Основная программа для расчета и построения ВАХ (рис.3) затененного СЭ имеет следующий вид:

```
script
clc
%Current-voltage characteristic of a shaded solar cell
% at diffeent values of the parameter a
xspan=[0,0.0017];
y0=3e7;
[x,y]=ode23(@Lilit5,xspan,y0);
plot(x,y)
grid on
hold on
[x,g]=ode23(@Shadowing1,xspan,y0);
plot(x,g)
hold on
[x,h]=ode23(@Shadowing2,xspan,y0);
plot(x,h)
[x,z]=ode23(@Shadowing3,xspan,y0);
plot(x,z)
[x,p]=ode23(@Shadowing4,xspan,y0);
plot(x,p)
hold on
[x,q]=ode23(@Shadowing5,xspan,y0);
plot(x,q)
hold on
title('I-V Characteristics of solar cell partially shadowed')
xlabel('Voltage,V')
ylabel('Current,I')
```

Основная программа для расчета и построения P-V характеристик (рис. 4) затененного СЭ имеет следующий вид:

```
script
clc
%Power-voltage characteristic of a shaded solar cell
% at diffeent values of the parameter a
xspan=[0,0.0017];
y0=3e7;
[x,y]=ode23(@Lilit5,xspan,y0);
plot(x,y.*x)
grid on
hold on
[x,g]=ode23(@Shadowing1,xspan,y0);
plot(x,g.*x)
hold on
[x,h]=ode23(@Shadowing2,xspan,y0);
plot(x,h.*x)
hold on
```

```

[x, z]=ode23 (@Shadowing3, xspan, y0);
plot (x, z.*x)
hold on
[x, p]=ode23 (@Shadowing4, xspan, y0);
plot (x, p.*x)
hold on
[x, q]=ode23 (@Shadowing5, xspan, y0);
plot (x, q.*x)
hold on
title('P-V Characteristics of solar cell partially shadowed')
xlabel('Voltage, V')
ylabel('Power, W')

```

Моделирование частично затененного фотоэлектрического модуля.

Существуют различные модели для расчета фотоэлектрических модулей с затененными элементами, большинство из которых сочетают численные алгоритмы с представленными выше моделями [4-7]. Для изучения влияния затенения на характеристики фотоэлектрических модулей нами была выбрана среда MATLAB, как наиболее универсальный инструмент для математических приложений, который ранее успешно использовался при моделировании фотоэлектрических систем и извлечении параметров СЭ [8-10].

Расчет вольт-амперной характеристики (ВАХ) фотоэлектрического модуля в среде MATLAB при различных значениях коэффициента затенения проводился с использованием модели Бишопа. Исследуемый фотоэлектрический модуль состоит из 36 последовательно соединенных СЭ, один из которых затенен, причем коэффициент затенения изменяется в интервале ($0 \leq \alpha \leq 1$).

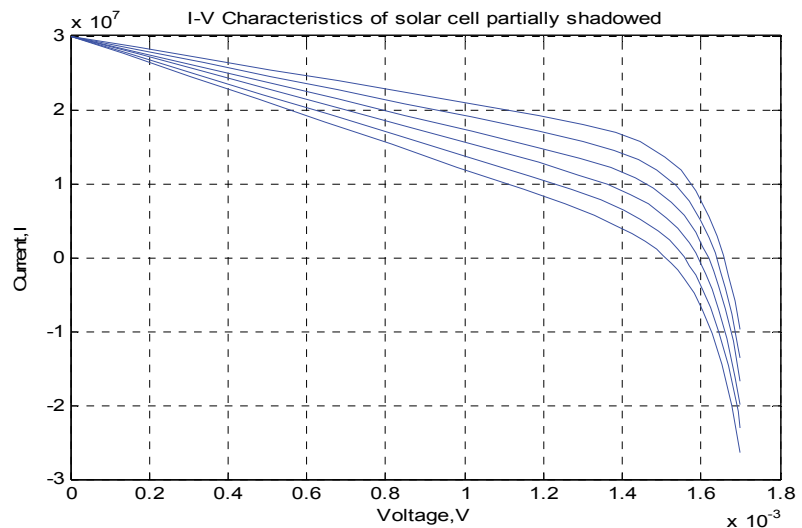


Рис. 3. ВАХ фотоэлектрического элемента при разных значениях α

ВАХ фотоэлектрического модуля, состоящего из последовательно соединенных СЭ, определяется формулой (3) с учетом следующих допущений:

$$I_M = I_C; V_M = mV_C; V_{Mb} = mV_{Cb}; R_{Ms} = mR_{Cs}; R_{Mp} = mR_{Cp}, \quad (12)$$

где с индексом "M" обозначены параметры, относящиеся к фотоэлектрическому модулю, а с индексом "C" – к фотоэлектрическому элементу.

Выходное напряжение фотоэлектрического модуля представляет собой сумму напряжений, генерируемых на отдельных элементах:

$$V = V_{ill} + V_{sh}, \quad (13)$$

где V - общее напряжение фотоэлектрического модуля, а V_{ill} и V_{sh} - суммарные напряжения на освещенных и затененных элементах соответственно.

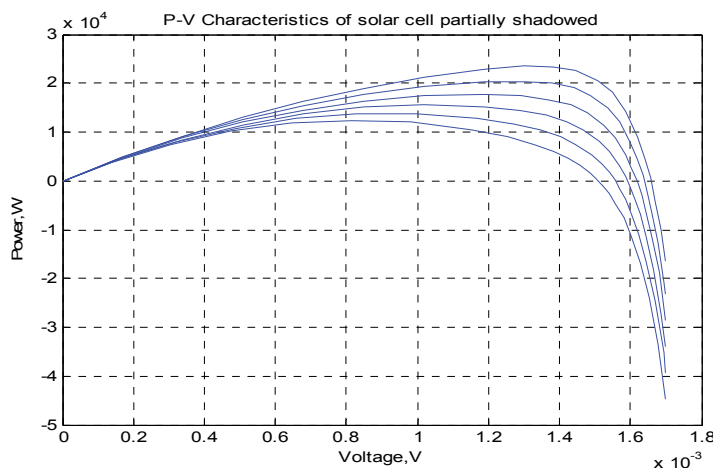


Рис. 4. P – V характеристики фотоэлектрического элемента при разных значениях a

Ток через все элементы одинаковый и записывается в виде

$$I = I_{ill} = I_{sh}, \quad (14)$$

где I - ток через фотоэлектрический модуль; I_{ill} и I_{sh} - токи через освещенные и затененные элементы соответственно.

Исходя из (3) и (12), для I_{ill} и I_{sh} получим следующие выражения:

$$I_{ill} = I_{L1} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V_{ill} - R_{Cs}I_{ill})}{m_1 kT}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V_{ill} - R_{Cs}I_{ill}}{R_{Cp}}\right) \cdot \left[1 + a \left(1 - \frac{V_{ill} - R_{Cs}I_{ill}}{V_{Cb}}\right)^{-n} \right], \quad (15)$$

$$I_{sh} = I_{L2} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V_{sh} - R_{Cs}I_{sh})}{m_2 kT}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V_{sh} - R_{Cs}I_{sh}}{R_{Cp}}\right) \cdot \left[1 + a \left(1 - \frac{V_{sh} - R_{Cs}I_{sh}}{V_{Cb}}\right)^{-n} \right]. \quad (16)$$

Здесь I_{L1} и I_{L2} – фототоки для нормальных и затененных фотоэлектрических модулей, для которых можно записать

$$I_{L1} = \frac{I_{gr}}{I_{gr}^*} I_{CL}^* [1 + \alpha_T (T - T_0)], \quad (17)$$

$$I_{L2} = \frac{I_{gr}}{I_{gr}^*} I_{CL}^* (1-a) [1 + \alpha_T (T - T_0)], \quad (18)$$

где I_{CL}^* и I_{gr}^* – фототок и интенсивность солнечного излучения фотоэлектрического элемента при стандартных условиях облучения.

Нелинейные уравнения, заданные выражениями (15) - (18), могут быть решены для полностью освещенных элементов и для одного затененного элемента с помощью алгоритма Ньютона-Рафсона. Значение $m_1 = 35$ было использовано для моделирования СЭ фотоэлектрического модуля, работающих в отсутствие затенения.

Моделирование фотоэлектрического модуля, у которого один из 36 СЭ подвергается затенению с переменным коэффициентом затенения, было проведено согласно уравнениям (12) - (16).

График ВАХ приведен на рис. 5 в стандартных условиях работы для следующих параметров: $V_{OC} = 18V$, $I_{SC} = 3.7A$, $R_p = 1k\Omega$, $R_s = 10m\Omega$, $V_b = -20V$ и $n = 3$. На рис. 5 показаны результаты моделирования фотовольтаического модуля в зависимости от коэффициента затенения одного элемента из 36 СЭ. Остальные 35 элементов работают в отсутствие затенения при освещенности 960 Вт/м^2 и температуре 47°C .

На рис. 6 показаны I-V характеристики, полученные для частично затененного СЭ, работающего в обратном смещении, в зависимости от коэффициента затенения.

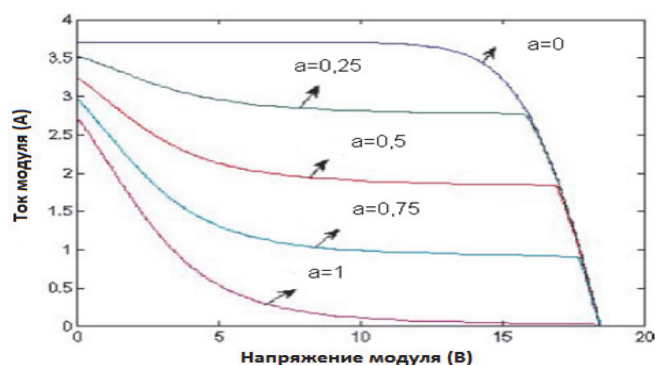


Рис. 5. Результаты моделирования фотоэлектрического модуля при частичном затенении одного элемента

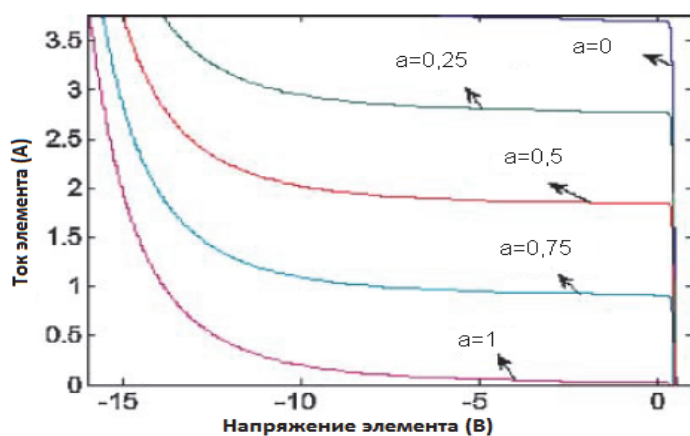


Рис. 6. ВАХ солнечного элемента под воздействием затенения и при обратном смещении

Выводы. Предложена модель расчета частично затененных фотоэлектрических элементов, которая может быть также применена для изучения обратных характеристик затененных СЭ, входящих в состав фотовольтаического модуля.

Снижение выходной мощности фотоэлектрического модуля за счет затенения оценивалось с учетом влияния уровня освещенности и коэффициента затенения на элементе фотоэлектрического модуля. Уменьшение выходной мощности фотовольтаического модуля на 30% может наблюдаться из-за полного затенения только одного СЭ. Потери мощности были коррелированы с изменением последовательного и шунтирующего сопротивлений фотоэлектрического модуля из-за затенения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Spirito P., Abergamo V.** Reverse bias power dissipation of shadowed or faulty cells in different array configurations // Proceedings of the Fourth European Photovoltaic Solar Energy Conference. - 1982. - P. 296–300.
2. **Lopez Pineda C.F.** Experimental evaluation of reverse bias stress induced on photovoltaic modules for different configurations // Solid Wind Technology. - 1986. - 3(2). - P. 85–88.
3. **Bishop J.W.** Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits // Solar Cells. - 1998. - 25. - P. 73–89.
4. **Quaschnig V., Hanitsch R.** Numerical simulation of photovoltaic generators with shaded cells // Proceedings Of the 30th Universities Power Engineering Conference. - 1995. - P. 583–586.

5. Simulation of I-V characteristics of a PV module with shaded PV cells / **H. Kawamura, K. Naka, N. Yonekura**, et al // Solar energy Materials & Solar cells. - 2003. - 75. - P. 613–621.
6. **Hermann W., Wiesner W.** Modelling of PV modules—the effects of non-uniform irradiance on performance measurements with solar simulators // Proceedings of the 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference. - 2000. - P. 2338–2341.
7. **Alonso Garcí'a M.C., Rui'z J.M.** Analysis and modelling the reverse characteristic of photovoltaic cells // Solar Energy Materials and Solar Cells. - 2006. - 90. - P. 1105–1120.
8. <http://www.mathworks.com/>
9. **Silvestre S., Guasch D., Ortega P., Calatayud R.** Photovoltaic systems modelling using matlab and Simulink // Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference. - 2004. - P. 2207–2210.
10. Solar cell model parameter extractor based on matlab / **P. Ortega, S. Silvestre, D. Guasch**, et al // Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference. - 2004. - P. 2194–2197.

Գ.Հ. ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ, Ա.Գ. ՔԱՄԱԼՅԱՆ, Ջ.Ս. ՍԵՎՈՅԱՆ, Լ.Գ. ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ
ՍՏՎԵՐՄԱՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ՖՈՏՈՎՈԼՏԱՅԻՆ ՄՈԴՈՒԼԻ
ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՎՐԱ

Դիտարկվել է մասնակի ստվերման ռեժիմում աշխատող ֆոտովոլտային տարրերի բնութագրերի սիմուլյացիայի և մոդելավորման ընթացակարգը: Գնահատվել է մեկ արևային տարրի ստվերման գործակցի ազդեցությունը ֆոտովոլտային մոդուլի հիմնական բնութագրիչ պարամետրերի վրա:

Առանցքային բաներ. ֆոտոէլեկտրական մոդուլ, ստվերում, ոչ բացահայտ ֆունկցիա, հիմնական ծրագիր, դիֆերենցիալ հավասարում, ենթածրագիր, ֆոտոհոսանք:

G.H. KIRAKOSYAN, A.G. QAMALYAN, J.S. SEVOYAN,
L.G. KIRAKOSYAN

INFLUENCE OF SHADING THE CHARACTERISTICS OF THE PV
MODULE

The procedure for modeling and calculating the characteristics of PV cells, operating in a partially shaded mode is considered. The influence of the shading coefficient of one solar cell on the main characteristic parameters of the PV module is evaluated.

Keywords: photoelectric module, shading, implicit function, main program, differential equation, routine, photocurrent.